

Réalisation d'un banc de test à échelle réduite pour l'émulation des véhicules électriques et de leurs composants

Par

Hannachi Chadi

Jury:

João Pedro Trovão (Directeur)	Université de Sherbrooke, Canada
Ahmed Khoumsi (Codirecteur)	Université de Sherbrooke, Canada
Said Elkoun (Rapporteur)	Université de Sherbrooke, Canada
Ruben Gonzalez-Rubio	Université de Sherbrooke, Canada

Mémoire présenté au Département de génie électrique
en vue de l'obtention du grade de maître en génie électrique (MSc.)

FACULTÉ DE GÉNIE

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada

Mars 2019

Résumé

Depuis le début du XXe siècle, la température moyenne de la planète a des répercussions sur l'environnement. L'augmentation d'émission de gaz à effet de serre est parmi les principaux facteurs de ce changement climatique, où le domaine du transport représente le facteur principal avec un pourcentage important. C'est pour cela que certains gouvernements ont commencé à encourager les consommateurs de faire la transition vers les véhicules électriques.

Vu que le véhicule électrique présente une innovation dans le monde de l'automobile, cette dernière a rencontré beaucoup de défis. Pour valider la fiabilité de ces véhicules, de nombreux essais expérimentaux doivent être réalisés. Dans le but de répondre à ces besoins, les groupes de recherche et développement s'intéressent à l'émulation de la chaîne de traction par banc d'essai à échelle réduite afin de réduire les coûts et le temps du développement. Pour cela, nous utiliserons une approche de simulation HIL (**Hardware-In-the-Loop**) qui consiste à remplacer la machine de traction par une autre machine électrique (échelle réduite) et l'environnement du véhicule (transmission, châssis, roues et son interaction avec la route) par une deuxième machine électrique qui émulerait un comportement similaire à l'environnement du véhicule. La simulation HIL est effectuée dans le but d'obtenir une validation de la compatibilité des équipements avant l'implémentation et l'étude de son comportement sur le banc d'essai. Ces deux approches de simulations seront démontrées dans ce mémoire.

Dans ce projet mémoire, nous étudions la modélisation, la représentation et la simulation du véhicule eCommander. Nous visons à réaliser un banc d'essai à échelle réduite pour effectuer des simulations en temps réel afin de valider différentes topologies de véhicules électriques, des stratégies de gestion d'énergie, des commandes de machines électriques, de nouvelles topologies d'électronique de puissance et leurs commandes, etc.

Mots clés: Hardware-In-The-Loop (HIL), simulation HIL de type puissance, émulation à échelle réduite, REM, Commande par inversion, véhicule électrique, eCommander.

Remerciement

Voici l'heure des remerciements...

Mes premiers remerciements vont directement à mes encadrants: mon directeur de maîtrise professeur João Pedro Trovão, merci professeur pour votre temps et vos conseils techniques et professionnels qui auront su guider ma compréhension de l'électronique de puissance et des véhicules électriques. J'aimerais aussi remercier mon co-directeur le professeur Ahmed Khoumsi dont les conseils m'ont aidé à faire des choix pour au final aller dans la bonne direction.

Merci aux professeur Said Elkoun et professeur Gonzalez Ruben-Rubio qui ont accepté de faire partie du jury et d'investir du temps dans la lecture de ce manuscrit. Leurs avis me permettront de m'améliorer.

Je voudrais également remercier les membres du E-TESC lab. Ne perdez pas votre convivialité et votre esprit d'entraide, ce sont des atouts précieux. Un grand merci particulièrement à Bao-Huy, Mebrahtom, Ahmed, Alexandre, Mande, Pascal, Félix et Jonathan pour leur convivialité.

Cette vie au Québec n'a pas été qu'une vie d'étudiant. J'ai pu rencontrer des personnes très différentes et je me suis fait de très nombreux amis, je veux tous les remercier, ils m'ont permis de me sentir bien, de vivre des expériences auxquelles je n'aurais jamais pensé avant de venir ici. La liste des personnes à remercier est très longue. Cette aventure étant un peu comme une pièce de théâtre avec tous les rebondissements que cela peut engendrer, c'est pourquoi je veux remercier les acteurs de cette aventure.

« The last and not the least » mes parents, qui m'ont soutenu du mieux qu'ils peuvent, qui m'ont encouragé et qui ont toujours cru en moi. Malgré les doutes, la douleur et la difficulté de la distance, ils étaient et continuent à être présents. Ils m'ont montré que ce que je fais compte pour eux, cela m'a toujours motivé et j'espère être à la hauteur de leur fierté. On ne choisit pas sa famille, mais je pense avoir été chanceux. Merci mes sœurs, vous êtes les meilleures sœurs qu'on puisse espérer.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	i
Remerciement.....	ii
Liste des figures.....	vi
Liste des symboles.....	xi
Chapitre 1 : Introduction générale	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Mise en contexte	2
1.3 Problématique	2
1.4 Définition du projet de recherche	2
1.5 Objectifs du projet de recherche	3
1.6 Structure du mémoire	3
Chapitre 2 : État de l’art	5
2.1 Généralités sur l’émulation à temps réel.....	5
2.1.1 Système de simulation en temps réel.....	5
2.1.2 Simulation logicielle.....	6
2.2 Simulation Hardware-In-The-Loop.....	6
2.2.1 Simulation HIL de type signal.....	7
2.2.2 Simulation HIL de type puissance (P-HIL).....	8
2.3 Les différentes « Simulation P-HIL »	9
2.3.1 « Simulation P-HIL » de type électrique	9
2.3.2 « Simulation P-HIL » de type mécanique :	10

2.4	Différentes échelles d'émulation :.....	11
2.5	Représentation énergétique macroscopique (REM).....	13
2.6	Structure de commande par inversion :	18
2.7	Le véhicule électrique étudiée « eCommander »	20
2.8	Conclusion de la revue de littérature.....	22
Chapitre 3 Développement de la REM du véhicule eCommander		24
3.1	Modélisation dynamique et la REM du véhicule eCommander	25
3.2	Commande du véhicule eCommander :.....	32
3.2.1	Structure de commande par inversion	32
3.2.2	Structure pratique de la commande du véhicule eCommander :	36
3.3	Résultat de la simulation du véhicule eCommander :.....	37
3.4	Conclusion :	42
Chapitre 4 Implémentation de la « Simulation P-HIL ».....		43
4.1	Organisation de la simulation HIL :	43
4.2	REM et « Simulation HIL » à pleine échelle :.....	44
4.3	Simulation HIL de type mécanique à échelle réduite.....	46
4.3.1	Organisation de la « Simulation HIL » à échelle réduite	46
4.3.2	REM et « Simulation HIL » à échelle réduite	51
4.4	Conclusion	53
Chapitre 5 : Émulation temps réel d'un véhicule électrique.....		55
5.1	Structure du banc d'essai :.....	55
5.1.1	CANopen.....	56
5.1.2	Test de la commande des machines d'émulation séparément.....	57

5.2	Mise en œuvre de P-HIL à échelle réduite	57
5.3	« Émulation P-HIL » des systèmes étudiés :	59
5.3.1	Validation du eCommander :	60
5.3.1.1	Résultat de P-HIL suivant le Cycle NEDC	60
5.3.1.2	Résultat de P-HIL à échelle réduite suivant le Cycle WLTC de deuxième classe : 61	
5.3.2	Validation de la SMART d'ATEUS :	62
5.3.2.1	Résultat de P-HIL suivant le Cycle NEDC	63
5.3.2.2	Résultat de P-HIL suivant le Cycle WLTC	64
5.4	Conclusion	66
	Conclusion générale	67
6.1	Conclusion	67
6.2	Discussion et futur travail :	67
	Annexe A : Commande par Inversion de la REM	69
	Annexe B : Topologie de la SMART de l'ATEUS et modélisation	74
	Annexe C : Installation du Movidrive MDX60B/61B	76
	Bibliographies.....	82

Liste des figures

FIGURE 2-1 ILLUSTRATION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION [6].....	6
FIGURE 2-2 « SIMULATION HIL » DE TYPE SIGNAL [6].....	7
FIGURE 2-3 « SIMULATION HIL » DE TYPE PUISSANCE [6].....	8
FIGURE 2-4 : IMPLÉMENTATION D'UNE « SIMULATION HIL » DE TYPE PUISSANCE.(MODIFIÉ DE [9])	9
FIGURE 2-5 « SIMULATION P-HIL » DE TYPE ÉLECTRIQUE [6].....	10
FIGURE 2-6 SIMULATION HIL DE TYPE MÉCANIQUE [6]	10
FIGURE 2-7 CYCLE EN V DES ÉCHELLES D'ÉMULATION	11
FIGURE 2-8 « SIMULATION HIL » DE TYPE PUISSANCE À ÉCHELLE RÉDUITE	13
FIGURE 2-9 UTILISATION DES DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE « SIMULATION HIL ».....	13
FIGURE 2-10 PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE SIMULATION	14
FIGURE 2-11 ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE LA REM (A) :ÉLÉMENT DE SOURCE (B) :ÉLÉMENT D'ACCUMULATION (C) : ÉLÉMENT DE CONVERSION (D) : ÉLÉMENT DE COUPLAGE [18].	15
FIGURE 2-12 : EXEMPLES D'ASSOCIATION [16].....	16
FIGURE 2-13 A) COMMANDE À BOUCLE OUVERTE B) COMMANDE À BOUCLE FERMÉE	17
FIGURE 2-14 A) SCHÉMA BLOC ET B) REM D'UN SOUS-SYSTÈME.....	18
FIGURE 2-15 : RÈGLE D'INVERSION DE LA REM [27]	19
FIGURE 2-16 COMMANDE PAR INVERSION INDIRECTE A) SCHÉMA BLOC B) REM.....	20
FIGURE 2-17 SCHÉMATISATION DES ÉTAPES À SUIVRE POUR RÉSOUDRE LA PROBLÉMATIQUE.....	23
FIGURE 3-1 PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE LA SIMULATION P-HIL	24
FIGURE 3-2 SOUS-SYSTÈME DE TRACTION.	25
FIGURE 3-3 REPÈRES $d - q$ ET $\alpha - \beta$ DE RÉFÉRENCE.....	28
FIGURE 3-4 REM DU SOUS-SYSTÈME DE TRACTION DU SYSTÈME ÉTUDIÉ	32
FIGURE 3-5 CHÂÎNE DE RÉGLAGE	32

FIGURE 3-6 CHÂÎNE DE COMMANDE DE LA TRACTION.....	33
FIGURE 3-7 SMC ISSUE DE L'INVERSION DE LA REM DU SOUS-SYSTÈME DE TRACTION	35
FIGURE 3-8 STRUCTURE PRATIQUE DE COMMANDE ISSUE DE L'INVERSION DE LA REM DU SOUS-SYSTÈME DE TRACTION	37
FIGURE 3-9 SIMULATION DU VÉHICULE ECOMMANDER (MATLAB/SIMULINK).....	38
FIGURE 3-10 LA VITESSE DU VÉHICULE.....	38
FIGURE 3-11 TENSION DE LA BATTERIE	39
FIGURE 3-12 COURANT DE LA BATTERIE	39
FIGURE 3-13 COUPLE, VITESSE ET PUISSANCE MÉCANIQUE DE LA MACHINE DE TRACTION	40
FIGURE 3-14 COURANT DES ARMATURES D-Q DE LA MACHINE DE TRACTION	40
FIGURE 3-15 FLUX DE LA MACHINE DE TRACTION.....	40
FIGURE 3-16 COURANT DE PHASE DE LA MACHINE DE TRACTION.....	41
FIGURE 3-17 TENSION LIGNE-LIGNE DE L'ONDULEUR	41
FIGURE 4-1 DÉCOMPOSITION DU SYSTÈME ÉTUDIÉ	43
FIGURE 4-2 ORGANISATION DE LA SIMULATION HIL	44
FIGURE 4-3 REM DE LA SIMULATION HIL À PLEINE ÉCHELLE.....	46
FIGURE 4-4 ORGANISATION HIL À ÉCHELLE RÉDUITE	47
FIGURE 4-5: LIMITATIONS DES MACHINES D'ÉMULATION.....	48
FIGURE 4-6: CARTOGRAPHIE DE RENDEMENT DE LA MAS.....	48
FIGURE 4-7 LIMITATIONS À PLEINE ÉCHELLE ET À ÉCHELLE RÉDUITE.....	49
FIGURE 4-8 ORGANIGRAMMES DES RAPPORTS DE RÉDUCTION A) PUISSANCE MÉCANIQUE B) PUISSANCE ÉLECTRIQUE	50
FIGURE 4-9 REM DE SIMULATION HIL À ÉCHELLE RÉDUITE.....	51
FIGURE 4-10 SIMULATION HIL À ÉCHELLE RÉDUITE	52
FIGURE 4-11 VITESSE DU VÉHICULE	53

FIGURE 4-12 COUPLE, VITESSE ET PUISSANCE DU BANC D'ESSAI.....	53
FIGURE 5-1 CONFIGURATION MATÉRIELLE DE LA SIMULATION P- HIL DE TYPE MÉCANIQUE	56
FIGURE 5-2 MODÈLE MATLAB/SIMULINK D'OPAL-RT	58
FIGURE 5-3 « BLOC MAÎTRE » D'OPAL-RT.....	58
FIGURE 5-4 BLOC DE LA MACHINE DE CHARGE QUI ÉMULE L'ENVIRONNEMENT DE CONDUCTEUR	59
FIGURE 5-5 VITESSE DU VÉHICULE	60
FIGURE 5-6 COUPLES DES MACHINES D'ÉMULATION.....	60
FIGURE 5-7 VITESSE DE ROTATION DE LA MAS.....	61
FIGURE 5-8 VITESSE ECOMMANDER SUIVANT LE CYCLE « WLTC »	61
FIGURE 5-9 COUPLE DE LA MAS.....	62
FIGURE 5-10 COUPLE DE LA MSAP	62
FIGURE 5-11 VITESSE DE ROTATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE	62
FIGURE 5-12 VITESSE DE LA SMART	63
FIGURE 5-13COUPLE DE LA MACHINE DE TRACTION.....	64
FIGURE 5-14 COUPLE DE LA MSAP	64
FIGURE 5-15 VITESSE DE ROTATION DE LA MACHINE.....	64
FIGURE 5-16 VITESSE DE LA SMART	65
FIGURE 5-17 COUPLE MACHINE D'ÉMULATION A)MAS B)MSAP	65
FIGURE 5-18 VITESSE DE ROTATION DE LA MAS.....	65
FIGURE A-1 STRUCTURE AVEC UN CORRECTEUR PI	69
FIGURE A-2 STRUCTURES AVEC CORRECTEUR IP	69
FIGURE A-3 TESTS DE POURSUITE DES DEUX RÉGULATEURS PI ET IP [35].....	70
FIGURE A-4 SYSTÈME ÉTUDIÉ.....	71
FIGURE A-5 A) RÉPONSE D'UN SYSTÈME DE SECOND ORDRE PUR ET B) ABAQUE DU TEMPS DE RÉPONSE RÉDUIT [41] [26].....	72

FIGURE B-1 TOPOLOGIE D' ATEUS.....	74
FIGURE B-2 SMC DU SMART	75
FIGURE C-1 SCHÉMA DE CÂBLAGE [43]	76
FIGURE C-2 STRUCTURE DE VARIATEUR [43].....	77
FIGURE C-3 CONFIGURATION DES ENTRÉES SUR MOVITOOLS	78

Liste des symboles

Acronymes :

AIE	Agence Internationale de l'Énergie
BNFF	Bloomberg New Energy Finance
CAN	« Controller Area Network »
CO ₂	Dioxyde de Carbone
CTA	Centre Technologique avancé
ECU	« Electronic Component Units »
ESS	« Energy Storage System » (Système de stockage d'Énergie)
FEM	Force électromotrice
GIC	Graph Informationnel Causal
HIL	« Hardware In The Loop »
I	Interface d'accouplement
MAS	Machine Asynchrone
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
PA	Adaptateur de puissance
P-HIL	Simulation HIL de type puissance
REM	Représentation Énergétique Macroscopique
S-HIL	Simulation HIL de type signal
SMC	Structure Maximale de Commande
SPC	Structure Pratique de Commande
UDC	Cycle d'Essai Urbain
UDES	Université de Sherbrooke
VE	Véhicule Électrique

Notation	Définition	Unité
A_f	Surface de frottement frontale	[m ²]
C_{br}	Couple de freinage	[Nm]
C_{em}	Couple de la machine électrique	[Nm]
C_{eq}	Capacité équivalente utilisable de la batterie	[μF]
C_{tot}	Couple total	[Nm]
e	Force électromotrice	[V]
f	fréquence	[Hz]
F	Force	[N]
g	Accélération due à la gravité	[m.s ⁻²]
i	courant	[A]
J	Inertie	[kg.m ⁻²]
K	Gain Statique	
k_g	Rapport de transmission de la boîte de vitesse	

L	Inductance	[μH]
M	Masse	[kg]
P	Entrée de perturbation	[SI]
m	Rapport de modulation	[SI]
R ou r	Résistance interne de la batterie	[Ω]
R_{wh}	Rayon des roues du véhicule	[m]
p_p	Pairs de pôle	[SI]
U ou u	Tension compensée de l'onduleur	[V]
v	Vitesse	[m.s ⁻¹]
α	Pente	[%]
η_g	Rendement	[%]
$\theta_{d/s}$	Angle de rotation synchrone	[rad]
τ	Variable de réglage	[SI]
λ_{dr}	Flux de rotor	[Wb]
ω	Vitesse angulaire électrique	[rad.s ⁻¹]
Ω	Vitesse angulaire mécanique	[rad.s ⁻¹]

Indice :

bat	Batterie
C	Couple
fr	Frein
eq	Équivalent
g	« Gearbox » Boîte de vitesse
mes	Mesuré
P	Puissance
$-ref$	Référence
res	Résistive
tot	Total
tr	Transmission
v	Vent
V	Vitesse
ve	Véhicule
wh	Roue
Ω	Vitesse de rotation

Chapitre 1 : Introduction générale

1.1 Introduction

La température moyenne de la planète est en augmentation depuis le début du XXe siècle, et plus précisément depuis l'ère industrielle (1880-1899). Les transports participent largement à ce changement climatique (figure 1-1). Les gaz à effets de serre créés par la combustion des carburants fossiles activent ce phénomène. Dans 50 ans, le nombre d'automobiles pourrait augmenter de 360 % [1]. Dans un contexte où le désir collectif de respecter davantage l'environnement est ajouté au fait que les ressources pétrolières mondiales deviennent coûteuses et limitées, il est intéressant aujourd'hui de développer l'avenue de technologies plus écologiques, dont l'hybridation des véhicules de transport à motorisation thermique [1].

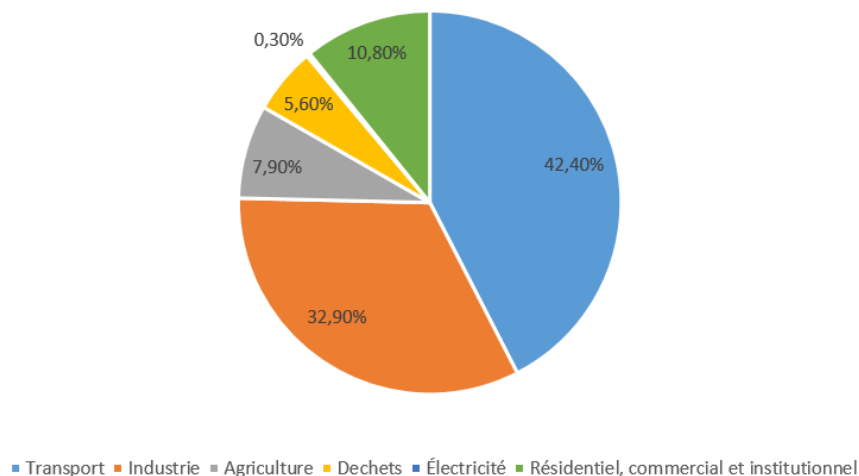


Figure 1-1 les Causes de changement climatique

En outre, sous la pression de la montée en puissance des préoccupations environnementales, de la volatilité du prix de pétrole et de la force régalienne des autorités publiques, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) appelle à réduire de 60 % les émissions des transports en 2050 par rapport à 1990 pour limiter la hausse de température [2]. Des moyens de transport plus propres doivent être proposés, c'est pour cela que les véhicules électriques (VEs) sont devenus une solution efficace pour réduire la consommation des fossiles combustibles et par conséquent les émissions de CO₂.

Le premier VE a été inventé en 1834 et les VEs ont commencé à être commercialisés à la fin de ce siècle par un certain nombre de sociétés [3]. Contrairement aux véhicules thermiques, les VEs n'entraînent pas la pollution et ne provoquent pas de réchauffement climatique par les émissions de CO₂ [4]. En fait, le VE est conforme aux tendances des gouvernements et propose une solution qui permettrait d'améliorer la qualité de vie sur la planète. Selon l'institut « *Bloomberg New Energy Finance (BNEF)* », les ventes annuelles de VEs passeront de 2 millions en 2020 à 41 millions

en 2040, ce qui correspond à 35 % du marché des véhicules. Les ventes de VE ont évolué comme suit [6] :

Tableau 1-1: Vente mondiale des véhicules électrique

Année	Amérique du Nord	Europe	Chine	Japon	Reste du monde	Total
2011	18000	12000	8000	14000	0	52000
2012	57000	30000	7000	27000	1000	122000
2013	100000	66000	10000	29000	1000	206000
2014	121000	96000	36000	32000	4000	289000
2015	122000	182000	128000	24000	6000	462000

1.2 Mise en contexte

Un véhicule électrique peut avoir beaucoup des variations, par exemple des variations de la vitesse et de la charge au cours d'un trajet donné. Ces variations peuvent induire des phénomènes physiques très variés, tels des transitoires de grandeurs électriques ou mécaniques. L'autonomie et la durée de vie des composants sont également influencées par ces sollicitations. Ainsi, afin de rendre les véhicules électriques plus fiables, les industries automobiles et les laboratoires de recherche ont besoin de faire plusieurs essais sur les composants de ces véhicules avant de les implémenter dans un système réel. Ces essais sont trop coûteux et parfois il est nécessaire de les refaire plusieurs fois et dans des conditions réelles.

Pour cette raison, notre projet de recherche vise à réaliser un banc d'essai à échelle réduite, afin de tester tous les composants en temps réel avant de les implémenter dans un système physique.

1.3 Problématique

Étant donné le besoin de nombreux essais pour les projets de recherche au sein de notre laboratoire et afin de valider expérimentalement les stratégies de gestion d'énergie, la commande des machines électriques, les nouvelles topologies d'électronique de puissance et leurs commandes, il est nécessaire de réaliser un banc de tests à échelle réduite. Cette approche permettra de minimiser les coûts des nombreux essais et de faciliter le travail dans le cadre du laboratoire, tout en se basant sur la simulation en temps réel.

1.4 Définition du projet de recherche

Au cours d'un trajet donné le véhicule peut avoir beaucoup des variations. Ces variations peuvent induire des phénomènes physiques très variés, tels des transitoires de grandeurs électriques ou mécaniques. L'autonomie et la durée de vie des composants sont également influencées par ces sollicitations.

Pour cette raison, ce projet de maîtrise vise principalement la validation d'un banc de test à échelle réduite afin de valider numériquement et expérimentalement les différents modèles développés au sein du laboratoire e-TESC de l'Université de Sherbrooke. La validation concernera les stratégies de gestion d'énergie, la commande des machines électriques, les nouvelles topologies d'électronique de puissance et leurs commandes.

Généralement, un banc d'essai contient deux parties principales : une partie qui concerne l'émulation du système d'alimentation en puissance, et une partie qui concerne l'émulation de l'environnement du conducteur. Chaque partie est divisée en deux entités : une première couche hardware et une deuxième couche software. Le terme « émulation » désignera la simulation physique d'un module composant le système, donc il ne s'agit pas d'une pure simulation numérique.

1.5 Objectifs du projet de recherche

L'objectif global : Émuler un véhicule électrique quelconque afin de valider des stratégies de gestion d'énergie dans un environnement contrôlé.

Objectifs spécifiques :

Le premier objectif consiste à modéliser numériquement un modèle d'un véhicule électrique et réaliser deux simulations respectivement à pleine échelle et à échelle réduite afin de les comparer et les valider avant l'implémentation sur un banc de test ultérieurement.

Le second objectif consiste à réaliser une « Simulation HIL » en utilisant le logiciel Matlab/Simulink et valider numériquement les résultats obtenus avant de faire l'implémentation sur le banc de test.

Le troisième objectif consiste à émuler le système de traction et l'environnement du conducteur. Le système de traction se compose d'une batterie, une chaîne de traction commandée par une électronique de puissance. L'environnement du conducteur se compose d'un châssis, des roues, d'une boîte de vitesses, de la route sur laquelle le véhicule roule et de toutes les conditions extérieures (vent, pluie, densité d'air, etc.). L'environnement sera émulé par une machine synchrone à aimant permanent commandée par un variateur de vitesse industriel.

Le quatrième objectif consiste à implémenter le système étudié sur le banc d'essai en utilisant des cycles de conduite bien définis comme référence afin de valider les résultats obtenus.

1.6 Structure du mémoire

Cette introduction succincte veillait à présenter le contexte, la problématique et les objectifs du mémoire. Le chapitre 2 couvre l'état de l'art qui commence par l'historique des véhicules électriques. Nous présenterons dans ce chapitre la littérature qui porte sur la simulation en temps réel, sur les types de simulation *Hardware In The Loop* (HIL) et sur la représentation énergétique

macroscopique (REM). Ceci nous permettra de définir une organisation synthétique et graphique d'une modélisation mathématique pour les systèmes peu importe leurs complexités.

Le chapitre 3 porte sur la modélisation du véhicule électrique en utilisant la REM, la commande par inversion et la stratégie de contrôle. Il présente aussi la modélisation et la simulation du système étudié.

Le chapitre 4 expose les « simulations HIL » de type puissance qui commence par l'organisation de cette simulation à pleine échelle. Puis on présente l'organisation de la simulation HIL à échelle réduite et la simulation numérique de cette organisation sur Matlab/Simulink.

Le chapitre 5 dévoile la mise en œuvre du banc d'essai qui sera utilisé pour valider les résultats obtenus expérimentalement. Nous avons commencé tout d'abord par l'implémentation de la « Simulation HIL » de type puissance dans la carte microcontrôleur d'Opal-RT. Puis nous avons réalisé la communication entre nos équipements par l'implantation du protocole CAN (*Control Area Network*). Enfin pour la commande de nos deux machines électriques d'émulation, nous avons effectué deux types de commande différentes où nous avons utilisé un onduleur à 6 IGBT et un variateur de vitesse industriel.

Finalement, le sixième chapitre présente la conclusion qui résume les travaux réalisés, les contributions originales présentées dans ce mémoire et les futurs travaux.

Chapitre 2 : État de l'art

Ce mémoire porte sur la réalisation d'un banc de test à échelle réduite afin de réaliser des simulations en temps réel en utilisant la Simulation HIL. De nombreux travaux ont déjà été réalisés au cours des dernières années pour résoudre cette problématique. Ces travaux ont été faits en utilisant des différentes philosophies dans le but de choisir la bonne méthode. Ainsi, afin de bien diriger la technique de résolution de la problématique en tenant compte des travaux réalisés auparavant, nous avons réalisé une étude bibliographique dont les résultats sont présentés dans ce chapitre.

2.1 Généralités sur l'émulation en temps réel

2.1.1 Système de simulation en temps réel

Analogique :

Les systèmes de simulation en temps réel analogiques contiennent des modèles réduits de différents composants dans les VEs (moteurs, générateurs, convertisseurs, etc.). L'avantage principal de ce système est le fonctionnement en temps réel car ces éléments constitutifs sont basés sur des composants physiques [5] [6]. Cependant, ils ont plusieurs désavantages, comme le manque de souplesse lors des changements des topologies et les coûts élevés d'exploitation et de maintenance.

Numérique :

Le simulateur en temps réel numérique est dédié à la simulation des véhicules ou des réseaux et peut être amené à effectuer des tests sur des systèmes d'électronique de puissance et leurs commandes aussi. Parmi les principaux systèmes de simulateurs dans le monde, on trouve plusieurs marques comme :

- RT-LAB (Opal-RT Technologies, Canada)
- DSpace
- Typhon
- RTDS (RTDS Inc., Canada)
- NETOMAC (SIEMENS, Allemagne)

Hybride :

Les systèmes hybrides de simulation en temps réel se divisent en deux sous-systèmes : le premier, est un simulateur numérique en temps réel, alors que le deuxième comporte des dispositifs analogiques de puissance [6]. Ces deux sous-systèmes allient les avantages des simulateurs numériques et analogiques.

2.1.2 Simulation logicielle

La simulation logicielle est utilisée pour vérifier la performance de la commande. Le modèle du système et le modèle de la commande sont tous les deux dans le même environnement de simulation [5]. Le processus actuel est donc remplacé par un modèle qui peut également être décomposé en sous-systèmes (figure 2-1).

La simulation sur ordinateur est considérée comme un outil pour tester les dynamiques des systèmes étudiés et leurs commandes. Le système étudié et sa commande sont tous les deux dans le même environnement de simulation. Cette simulation ne contient que des modèles, toutes les variables transitant entre les sous-systèmes ne sont que des signaux [6].

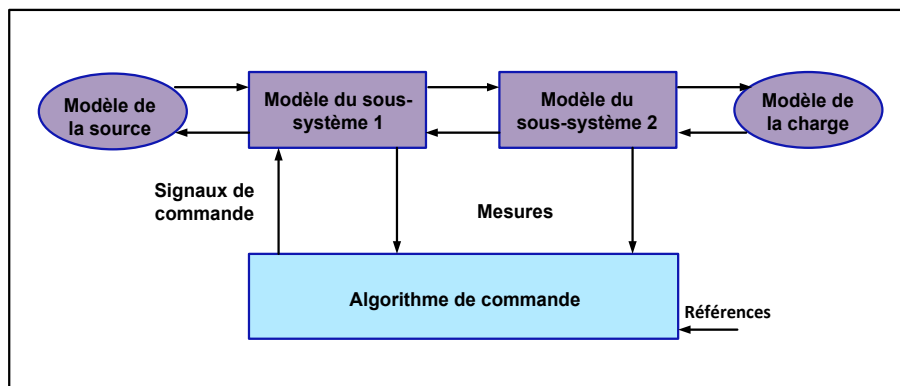


Figure 2-1 Illustration de l'environnement de simulation [6]

2.2 Simulation Hardware-In-The-Loop (HIL)

Depuis les années 1990, les industries d'automobiles ont utilisé la simulation HIL pour tester l'ECU (*Electronic Control Unit*) [7][8]. L'anglicisme « HIL simulation » (*Hardware-In-the-Loop*) est un terme couramment utilisé dans le langage scientifique pour définir l'incorporation d'une partie physique dans une boucle de simulation [8]. En effet, cette méthodologie évite les tests d'intégration intenses et complexes sur le véhicule réel. La simulation HIL est devenue essentielle pour le développement dans l'industrie automobile [7][9].

La simulation HIL utilise un ou plusieurs dispositifs à la place de leurs modèles de simulation. L'autre partie du processus est simulée dans une carte microcontrôleur ou dans un ordinateur en parallèle.

Les simulations HIL contrairement à la simulation logicielle, sont généralement utilisées pour les tests de validation avant l'implémentation sur des processus réels. Il existe deux types de simulation HIL : Simulation HIL de type signal (S-HIL) et simulation HIL de type puissance (P-HIL). Cette dernière se divise elle-même en deux types de simulation : une Simulation P-HIL de type électrique et l'autre de type mécanique.

2.2.1 Simulation HIL de type signal

Pour la « simulation HIL », seulement la carte contrôleur est testée. Les autres composants du système comme l'électronique de puissance et la machine électrique sont simulés en temps réel.

- Objectif de simulation de type signal

La simulation S-HIL est utilisée pour tester les ECUs (*Electronic control unit*) avant leurs implémentations dans un système réel. L'algorithme de commande est développé dans un logiciel de simulation selon le choix de l'ECU. Ce type de simulation est utilisé dans les industries pour vérifier les ECUs dans différents modes d'opérations. Cette méthode permet de réaliser différents tests qui peuvent être répétés plusieurs fois et sera donc effectuée sans impact sur le système réel [9].

- Principe de la simulation HIL de type signal

Une simulation S-HIL est utilisée pour essayer l'ECU avant son implémentation dans le système réel, et pour assurer aussi la communication en temps réel des signaux de référence (figure 2-2) [6][9]. Le terme ECU s'accorde non seulement au microcontrôleur qu'autorise l'exécution des calculs de la commande en temps réel en fonction des mesures et des références, mais aussi à la commande introduite dans ce dernier.

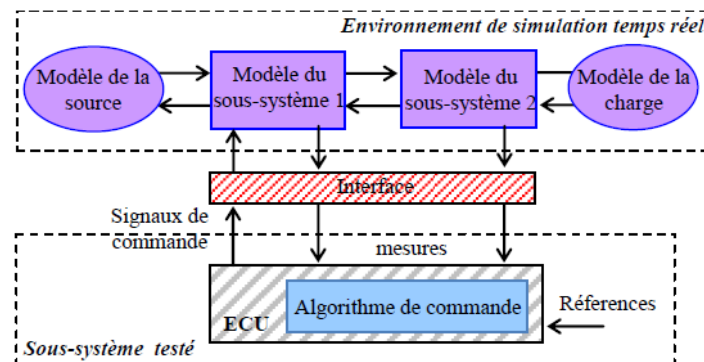


Figure 2-2 « Simulation HIL » de type signal [6]

- Exigences de la simulation HIL de type signal

L'ECU doit réagir comme s'il était connecté avec un système réel. Généralement un deuxième ECU simule le système étudié en temps réel (figure 2-2).

Les mesures doivent être fournies de la même manière que pour le processus réel. Pour cette raison, la période d'échantillonnage du calculateur d'émulation doit être adaptée pour prendre en compte la plus petite constante de temps du système [9]. Ceci induit une contrainte importante lors de la simulation du système avec un équipement électronique de puissance qui a une faible constante de temps en raison de la modulation.

Pour conclure, pour ce type de simulation, tous les composants sont remplacés par leurs modèles en utilisant uniquement les entrées et sorties. Les autres composants (électronique de puissance, machine électrique et charge mécanique) sont simulés en temps réel. Le système de simulation doit gérer les entrées et les sorties de la carte contrôleur sous test.

2.2.2 Simulation HIL de type puissance (P-HIL)

- Objectif de la « simulation HIL » de type puissance :

Une « simulation HIL » de type puissance permet de tester non seulement l'ECU, mais aussi un ou plusieurs sous-systèmes de puissance avant leur implantation dans le système réel complet.

L'objectif de cette simulation est de tester le sous-système dans différentes situations ou conditions avant son implantation dans un système global. Par rapport à un test sur un prototype, où les tests sont effectués par un conducteur, dans une « simulation HIL » de type puissance la répétabilité des essais permet de mieux tester les performances et les modes dégradés des sous-systèmes [9][10].

- Principe de la « simulation HIL » de type puissance :

Dans une « simulation P-HIL », le système de puissance est séparé en deux : le sous-système réel testé et le sous-système émulé (figure 2-3). L'interface I (figure 2-3) échangera donc des variables de puissance avec le sous-système testé, et des signaux avec le sous-système émulé. La simulation P-HIL est considérée comme une étape intermédiaire avant l'implémentation dans l'ensemble du système pour des raisons de sécurité et de flexibilité.

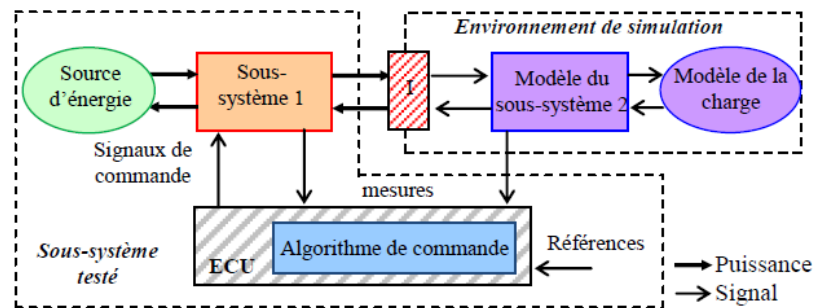


Figure 2-3 « Simulation HIL » de type puissance [6]

- Exigences de la simulation P-HIL

La machine d'émulation doit imposer le même comportement que la partie simulée. La commande d'émulation est développée en réalisant une communication entre cette dernière et les composants du sous-système. Toutes ces fonctions doivent être effectuées en temps réel. L'interface est ainsi composée d'un dispositif d'émulation, d'une charge d'émulation et d'une commande d'émulation [9] (figure 2-4).

En raison de sa connexion à la partie puissance à tester, l'interface a besoin d'un dispositif d'émulation qui fournit des variables compatibles au sous-système réel (figure 2-3).

Les mêmes exigences techniques que celles de la « simulation S-HIL » sont nécessaires. Cependant, d'autres conditions sont requises. La commande en boucle fermée du dispositif d'émulation doit être plus rapide que le temps de réponse du sous-système simulé.

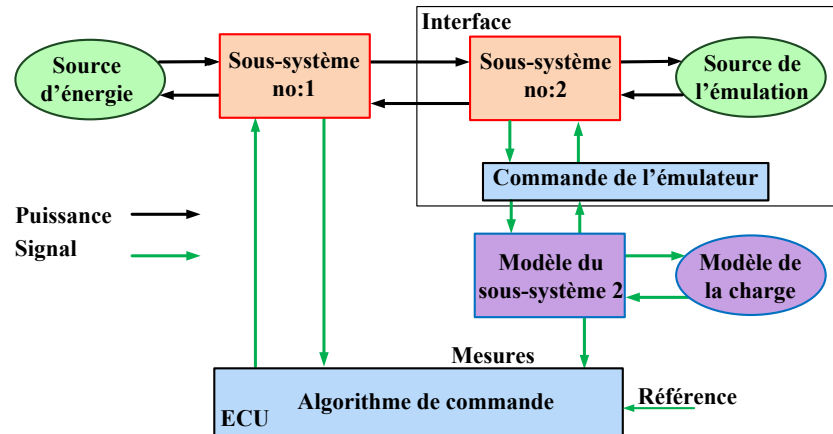


Figure 2-4 : Implémentation d'une « Simulation HIL » de type puissance.(Modifié de [9])

2.3 Les différentes « Simulation P-HIL »

2.3.1 « Simulation P-HIL » de type électrique

Dans ce cas, l'ECU et la batterie sont testés. L'effet de la modulation de fréquence peut ainsi être pris en compte, notamment son influence sur la compatibilité électromagnétique avec l'ECU [14]. De plus, l'effet de la décharge de la batterie peut également être étudié afin d'obtenir une modélisation précise de cette dernière [9].

Pour imposer le même courant que la machine de traction dans l'onduleur, une interface spécifique doit être utilisée. Un autre onduleur contrôlé est utilisé (figure 2-5). De plus, un inducteur est inséré pour lisser le courant, comme dans la machine. En outre, une autre batterie est utilisée pour stocker de l'énergie lorsque le système étudié accélère et pour alimenter le freinage par récupération [4].

La commande d'émulation est composée d'une boucle de courant qui commande le courant. Le courant de référence est généré par le modèle de la machine. De plus, la mesure de la tension de l'onduleur est requise comme entrée pour le modèle de la machine [4]. En raison de sa valeur modulée, cette mesure est complexe donc un filtre peut être utilisé.

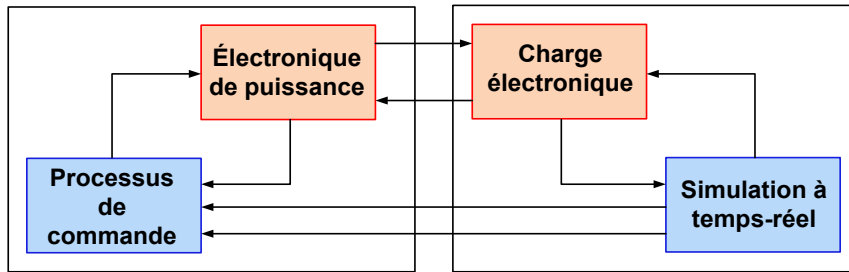


Figure 2-5 « Simulation P-HIL » de type électrique [6]

2.3.2 « Simulation P-HIL » de type mécanique :

- Objectif de la simulation HIL de type mécanique :

Pour la simulation P-HIL de type mécanique, l'ensemble de l'électronique de puissance et la machine électrique sont testés, alors que la partie mécanique est simulée. Le système global est testé en utilisant une charge mécanique pour effectuer l'émulation de l'environnement et tester le système de traction.

- Exigences de la simulation P-HIL de type mécanique :

Le système de simulation doit imposer des entrées et des sorties mécaniques à la machine électrique testée. De plus, les mesures sur la partie mécanique doivent être envoyées à la carte contrôleur testée. Une autre machine électrique est souvent utilisée comme charge mécanique commandée qui est alimentée par un deuxième ensemble d'électronique de puissance [9]. Une seconde carte (simulation en temps réel) est nécessaire pour commander la machine de charge et envoyer des mesures fictives mécaniques à la carte de contrôleur testée (figure 2-6). Cette méthode peut être appelée « simulation HIL » de type mécanique (figure 2-6) [4].

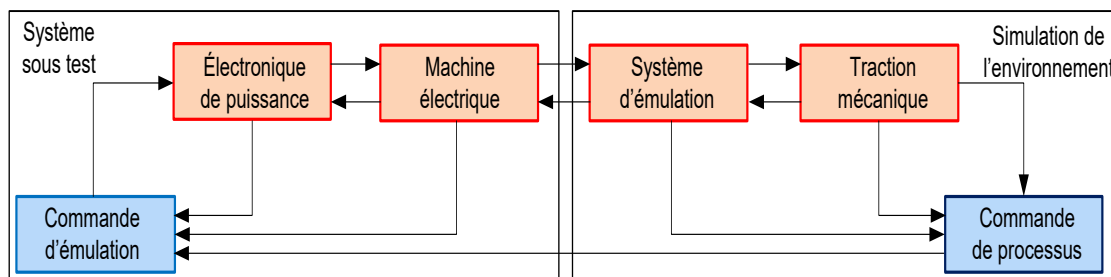


Figure 2-6 Simulation HIL de type mécanique [6]

Pourquoi la « simulation HIL » de type mécanique ?

Cette simulation est considérée comme un outil très puissant, car elle permet de tester une partie physique du système dans un environnement virtuel complètement contrôlé.

La «simulation HIL» permet aussi de tester des éléments en simulation dont les modèles ne paraissent pas assez précis pour subvenir au besoin de la simulation [9] [11].

Le test des composants physiques seuls ou dans un système est possible dans le cadre d'une émulation en temps réel. Cette étape peut être composée d'une émulation à échelle réduite, d'une émulation à pleine échelle ou les deux selon la complexité du système étudié.

2.4 Différentes échelles d'émulation :

Grâce à la « simulation HIL » de type puissance, nous pouvons réaliser deux types d'échelles d'émulation, une émulation à échelle réduite et une émulation à pleine échelle. Selon le type et la complexité du système étudié, une seule émulation peut être suffisante [6]. Afin de choisir l'une des deux échelles, il faut les intégrer dans le cycle en V (figure 2-7) et savoir aussi l'intérêt de ces deux échelles [12]. Le test du système et de ses composants à échelle réduite permet de réduire les coûts et le temps des essais, et d'approuver aussi les limitations du système étudié en toute sécurité. Ceci donne la main à valider les spécifications de cahier de charge [12]. Cette émulation est obligatoire avant l'implémentation dans un système réel. Cette méthode permet de définir et de vérifier le dimensionnement des composants. Si cette étape n'est pas effectuée et un problème intervenait, on aura un effet sur le temps et sur le coût.

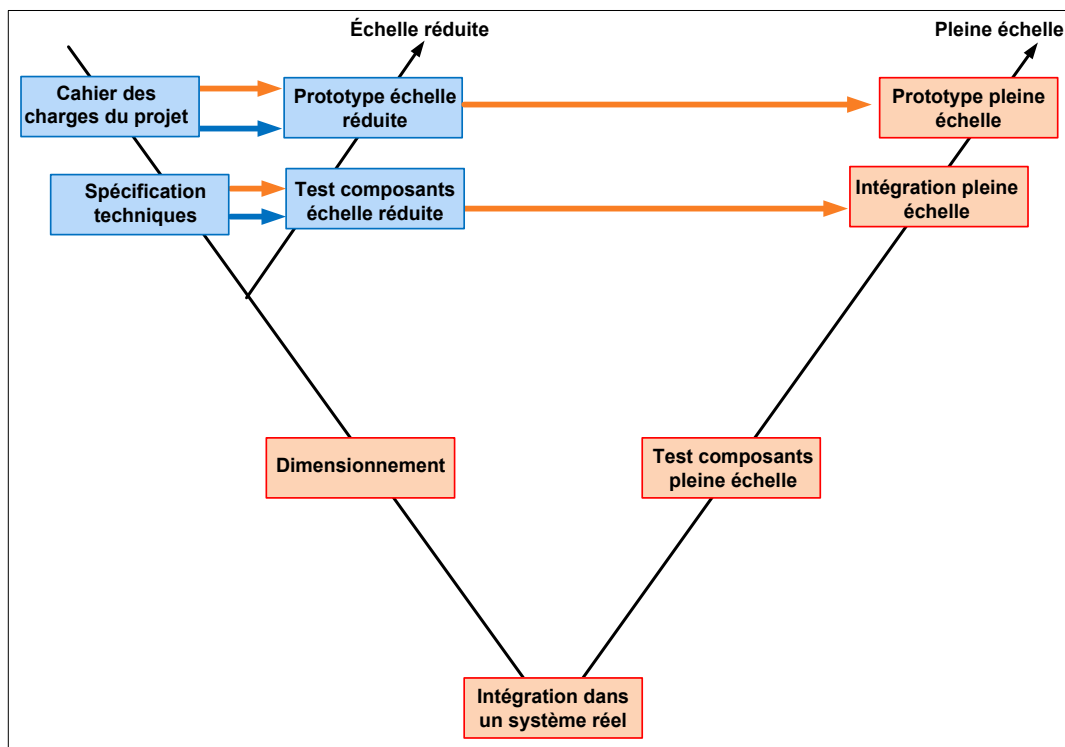


Figure 2-7 Cycle en V des échelles d'émulation

Pleine échelle :

L'émulation à pleine échelle permet de donner des informations précises sur les composants testés, et de tester les organes conformément au système réel. Généralement, les composants utilisés dans une émulation à pleine échelle sont identiques à ceux qui se trouvent dans le système réel [13]. Cette émulation ne serait pas capable de tester le calculateur si ce dernier n'est pas conforme à celui qui se trouve dans le système réel.

Les objectifs de l'émulation à pleine échelle :

- ✓ Vérifier les organes du système avant l'implémentation dans le système final.
- ✓ Vérifier la compatibilité des composants.
- ✓ Valider les résultats des simulations.
- ✓ Identifier les limitations du système étudié.

Échelle réduite :

L'émulation à échelle réduite est une étape importante avant le passage à la pleine échelle vu qu'elle permet le bon dimensionnement des composants. L'intérêt d'une méthode est la compatibilité non seulement avec le système étudié, mais aussi avec tous les systèmes [14].

Cette méthode se caractérise par la flexibilité lors des essais expérimentaux des différentes topologies.

Les objectifs de l'émulation à échelle réduite :

- ✓ Vérifier les composants avant le passage à l'émulation à échelle réduite.
- ✓ Valider la commande du système en temps réel.
- ✓ Valider le dimensionnement des composants.
- ✓ Réduire les coûts de dimensionnement des composants et le temps de développement.

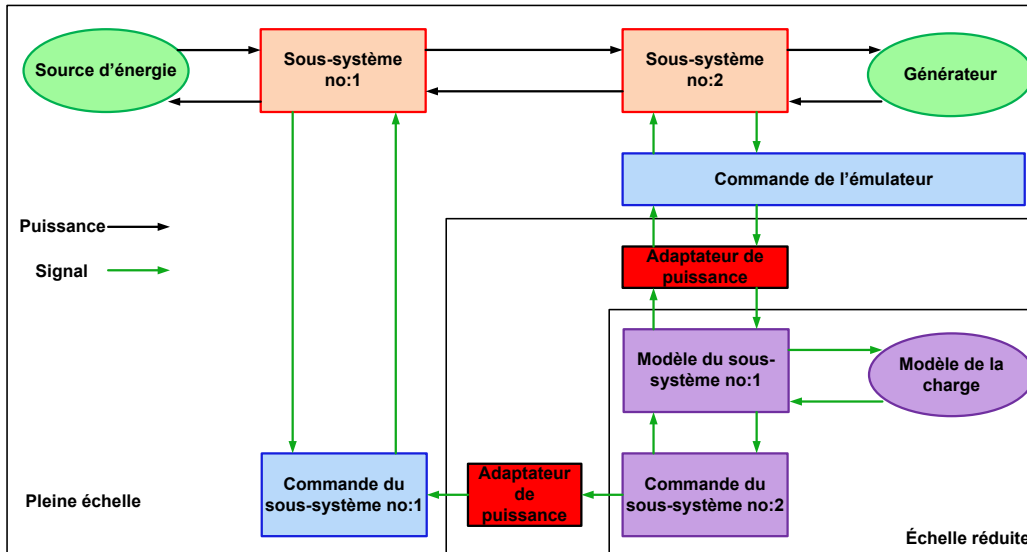


Figure 2-8 « Simulation HIL » de type puissance à échelle réduite

Pour passer de la simulation à l'émulation à pleine échelle, il y'a une démarche à suivre afin d'avoir les bons résultats désirés et d'éviter des pertes de temps et d'argent à cause du mal dimensionnement des organes du prototype (figure 2-9).

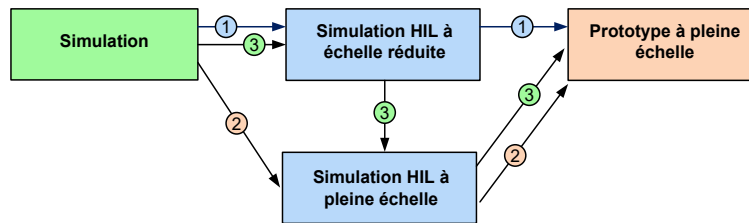


Figure 2-9 Utilisation des différentes échelles de « simulation HIL »

2.5 Représentation énergétique macroscopique (REM)

Pour le développement de la simulation des systèmes, il existe trois étapes importantes à respecter et à suivre (figure 2-10) [15] :

1. La modélisation mathématique des composant du système étudié.
2. Organisation du modèle.
3. Implémentation du modèle.

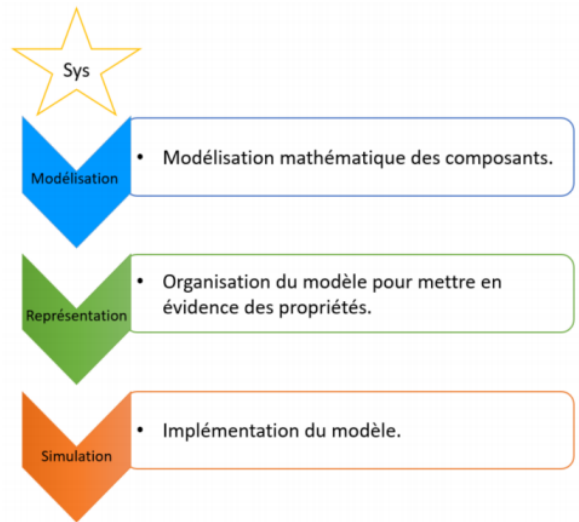


Figure 2-10 Processus de développement du système de simulation

La REM est un formalisme qui a été établi à l'aide des propriétés d'un autre outil de représentation, le Graphe Informationnel Causal (GIC) [15]. Le GIC permet de représenter graphiquement un système afin d'en déduire une commande de manière systématique. D'un point de vue qualitatif, le GIC est toutefois limité pour décrire de manière formelle les systèmes couplés comme pour la répartition d'énergie entre plusieurs sources [16]. L'utilisation de la REM se veut une extension macroscopique du GIC avec une symbolique explicite des couplages énergétiques. De plus, la REM est définie dans une approche systémique à travers le principe d'interaction. Il est important de souligner que la REM n'est pas une méthode de modélisation, mais d'organisation de modèle en vue d'une structuration de la commande du système [17]. La REM est caractérisée par deux notions :

- Notion de causalité.
- Notion d'action et de réaction.

Les quatre éléments qui constituent la REM sont les suivants :

A. Élément source :

L'élément source possède une seule entrée (ou un ensemble de grandeurs définies par un vecteur) et une seule sortie (ou vecteur de sorties), laquelle est influencée par la réaction du système auquel la source est connectée. Les éléments sources sont représentés par des pictogrammes ovales de couleur vert pâle avec un contour vert foncé (figure 2-11a) où x et y sont respectivement une entrée et une sortie [18] [19].

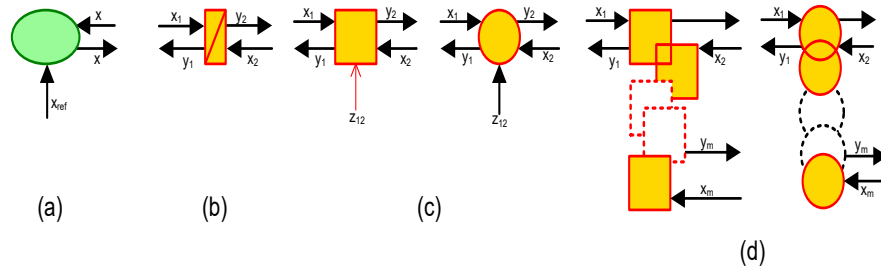


Figure 2-11 Éléments constitutifs de la REM (a) : Élément de source (b) : Élément d'accumulation (c) : Élément de conversion (d) : Élément de couplage [18].

B. Élément d'accumulation :

L'élément d'accumulation symbolise les accumulateurs, c'est-à-dire les systèmes à stockage d'énergie. L'élément d'accumulation emmagasine donc de l'énergie en interne (avec ou sans pertes). De ce fait, pour respecter la causalité intégrale, leurs sorties sont des fonctions intégrales des entrées. L'élément d'accumulation se décrit par un pictogramme barré et rectangulaire de couleur orange et à contour rouge (figure 2-11b) où x_1 et x_2 , y_1 et y_2 sont respectivement deux entrées et deux sorties [19].

C. Élément de conversion :

Dans un élément de conversion, il n'y a pas de stockage d'énergie. L'énergie qui entre sous une certaine forme est convertie, soit sous la même forme (on parle alors de modulation ou de conversion mono-physique), soit sous une forme différente (conversion multi-physique). L'élément de conversion se décrit par un pictogramme carré (conversion mono-physique) ou rond (conversion multi-physique) orange de contour rouge. Il possède une entrée et une sortie en amont, et une entrée et une sortie en aval [19]. Les entrées et sorties peuvent être soit des scalaires soit des vecteurs (figure 2-11c).

D. Élément de couplage :

L'élément de couplage est un élément de conversion qui assure un nœud énergétique entre plusieurs chaînes de conversion d'énergie. Il est constitué de plusieurs éléments de conversion qui partagent une ou plusieurs ressources physiques et qui induisent une variable commune. L'élément de couplage se décrit par des pictogrammes imbriqués. Comme pour l'élément de conversion, deux types de symboles sont possibles : carré (couplage mono-physique) et rond (couplage multi-physique), oranges de contours rouges [19] (figure 2-11d) Où x_1 , x_2 , x'_1 , x'_2 et x'_m sont des entrées et y_1 , y_2 , y'_1 , y'_2 et y'_m sont des sorties.

Après avoir connu les différents éléments constitutifs de la REM, on passe à l'étape suivante qui consiste à les assembler pour créer la REM de l'ensemble du système. Dans cette étape, les blocs ne peuvent être connectés que si leurs sorties et leurs entrées se correspondent. L'assemblage d'éléments se fait en utilisant les deux règles d'association suivantes (figure 2-12) et en utilisant aussi la notion d'action-réaction :

- ✓ **La règle de fusion** : Cette règle permet de fusionner deux éléments d'accumulation avec la même variable d'état.
- ✓ **La règle de permutation** : Cette règle permet de permuter deux éléments et permet d'obtenir un élément qui impose les mêmes sorties globales.

La notion d'action-réaction : Afin d'établir la méthodologie d'un outil de représentation physique telle que la REM, la notion d'action-réaction doit préalablement être définie. Quel que soit le niveau de granularité étudié d'un système, tout sous-système, composant ou élément, est régi par la notion d'action-réaction [19].

Une variable d'action est une variable qu'impose un sous-système à un autre. Une variable de réaction est une variable induite par la réaction du sous-système cible suite à sa sollicitation par une variable d'action [19].

Une représentation graphique est également proposée sous la forme d'une Représentation Énergétique Macroscopique (REM). Le système s'organise alors en pictogramme basique connecté suivant le principe d'action-réaction.

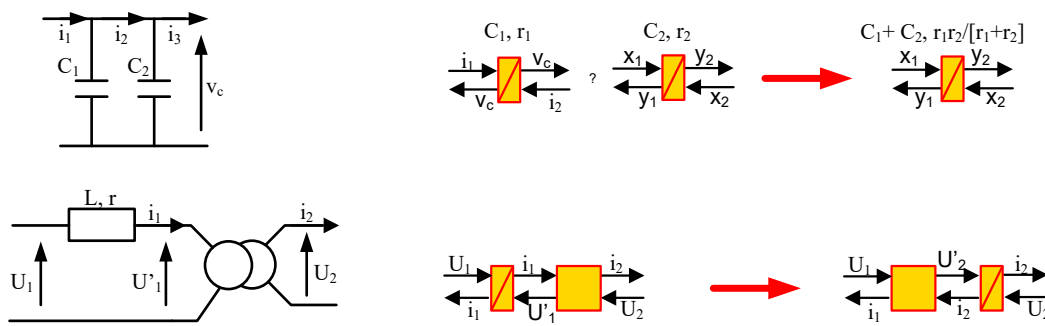


Figure 2-12 : Exemples d'association [16]

Il est important de signaler que la REM n'est pas une méthode de modélisation.

Généralité sur la commande :

Dans le but de réaliser une commande pour un système de traction, il faut tout d'abord coupler les composants du système étudié de la même manière que nous avons présentée dans le sous-chapitre précédent. Vu que ces composants possèdent un comportement non linéaire qui influence la stabilité du véhicule, il est nécessaire d'introduire une commande pour assurer cette stabilité.

Pour réaliser une commande pour un système qui présente une association de composants en interaction, il faut conduire une sortie $y(t)$ à un point de référence $y_{ref}(t)$, où $y(t) = f(t, x(t), p(t), u(t))$.

$u(t)$ Variable de réglage

t	Temps
p	Perturbation
$f()$	Comportement du système

La variable de réglage peut être définie soit en boucle ouverte ou en boucle fermée. Dans le cas de la commande en boucle ouverte, la commande est représentée par une inversion directe du modèle et de son point de référence, tel que $u(t) = g(t, x(t), p(t), y_{ref}(t))$, où $y(t) = y_{ref}(t)$ et $g()$ est l'inverse de $f()$.

Dans les cas où il n'est pas possible de réaliser une inversion directe, une inversion indirecte est prise en compte et sera réalisée en boucle fermée (figure 2-13b). L'opération en boucle fermée est caractérisée par de bonnes performances en termes de suivi et de robustesse [20][21].

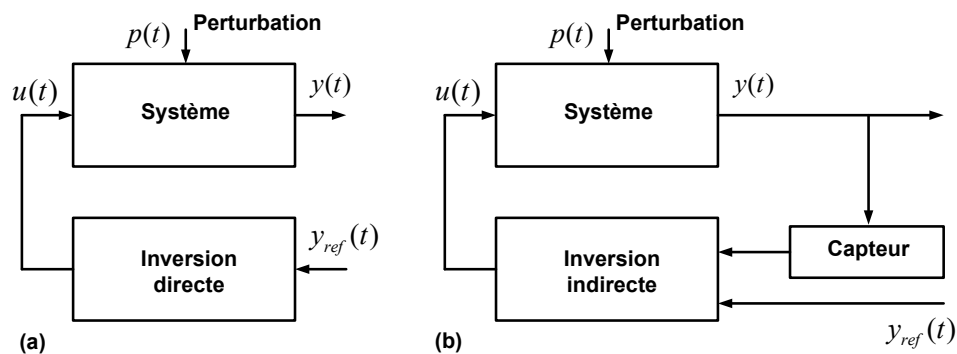


Figure 2-13 a) Commande à boucle ouverte b) Commande à boucle fermée

Pour minimiser l'erreur $e(t)$, un correcteur $C(t)$ doit être présenté comme cité dans l'équation ci-dessous :

$$u(t) = C(t) * e(t) \quad [22] \quad (2.1)$$

Pour assurer les performances désirées, les correcteurs associent des actions proportionnelles, intégrales et dérivées (P, PI, PID) [23] sur l'erreur $e(t)$. Alors pour avoir un système stable, les commandes et les paramètres de ses correcteurs doivent être développés, citons par exemple les la méthode de placement des pôles et la méthode du traçage des lieux des racines. Ces deux méthodes sont réalisées en utilisant la méthode de Routh-Hurwitz ou la méthode des marges de gains [24][21][25]. Ces outils permettent de synthétiser ces correcteurs afin d'avoir les performances désirées.

La majorité des systèmes à une seule entrée et une seule sortie peuvent être restreints en un système d'équations différentielles du premier ordre où en second de réécrire la complexité du système étudié.

Généralement les fonctions de transfert sont présentées sous la forme $P(s) = K/(1 + \tau s)$ [19]. Le sous-système énergétique peut être présentés suivant deux domaines différents :

Domaine temporel :

$$\frac{d}{dt} y_1 = (K(u - y_2) - y_1) \frac{1}{\tau} \quad (2.2)$$

Domaine de Laplace :

$$y_1 = (u - y_2) P_1(s) \text{ avec } P_1(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (2.3)$$

Où

K : Gain statique
 τ : Variable de réglage
 y_1 : Sortie
 y_2 : Perturbation

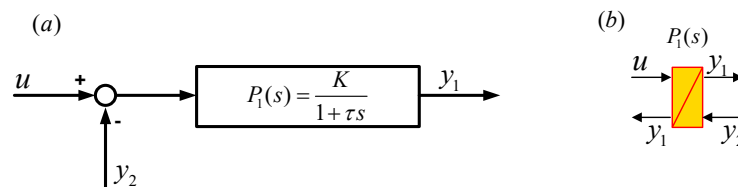


Figure 2-14 a) Schéma bloc et b) REM d'un sous-système

2.6 Structure de commande par inversion :

Suivant les règles citées dans le tableau ci-dessous, on peut réaliser un système de commande par inversion de la REM.

Une structure de commande peut être obtenue par inversion d'éléments tout le long du chemin de réglage (inversion de la REM). La *Inversion-Based Control* (IBC) (Commande par inversion) issue de la REM définit une structure de commande d'inversions directes et indirectes [19][26]. L'IBC est construite suivant une procédure composée de trois étapes :

- 1) Définition de la REM du système étudié.
- 2) Identification des variables de réglage de la REM.
- 3) Inversion un par un des éléments de la REM selon la chaîne de commande. Les éléments de conversion sont inversés en boucle ouverte. Les éléments d'accumulation sont inversés en boucle fermée. Les éléments de couplage sont inversés en boucle ouverte et suivant les relations mathématiques qu'ils utilisent (figure 2-11).

La structure maximale de commande (SMC) est définie à l'aide de l'IBC qui est composée du nombre maximal des correcteurs.

Il existe encore dans la bibliothèque de la REM un bloc qui est destiné aux stratégies qui définissent les références et les différentes entrées de la commande.

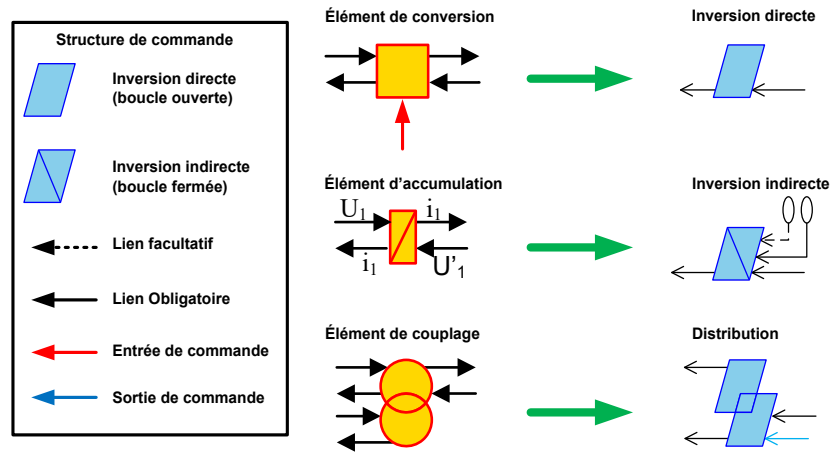


Figure 2-15 : Règle d'inversion de la REM [27]

La REM a été inventée entre autres, pour le développement de commande du système électromécanique. Les premiers travaux qui ont été réalisés en utilisant la REM étaient consacrés aux systèmes électromécaniques simples comme les machines à courant continu, les machines asynchrones qui ont une structure de commande stable et arrivant aujourd'hui à des travaux dédiés aux systèmes thermiques, fluidiques, etc. [28]

La relation entre la variable de référence y_{1-ref} et la variable de sortie y_1 est définie de la manière suivante en utilisant une fonction de transfert en boucle fermée :

$$T = \frac{y_1}{y_{ref}} = \frac{C_1 P_1}{1 + C_1 P_1} = \frac{\frac{k_{pl}}{k_{il}} s + 1}{\frac{\tau}{Kk_{il}} s^2 + \left(\frac{Kk_{pl} + 1}{Kk_{il}}\right) s + 1} = \frac{\frac{Kk_{pl}}{\tau} s + \frac{Kk_{il}}{\tau}}{s^2 + \left(\frac{Kk_{pl} + 1}{\tau}\right) s + \frac{Kk_{il}}{\tau}} \quad (2.4)$$

La figure 2-16 présente la commande par inversion indirecte en deux méthodes différentes :

- Schéma bloc
- Inversion de la REM

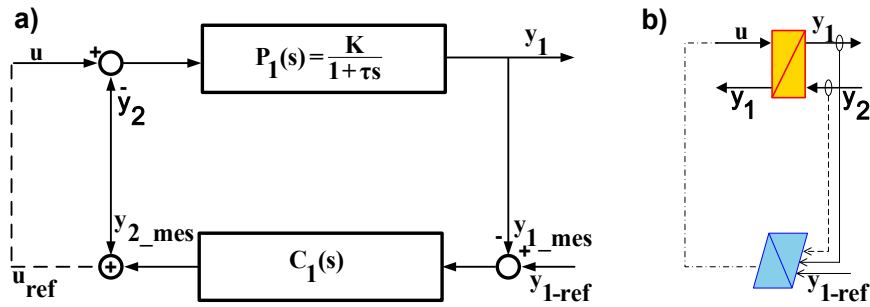
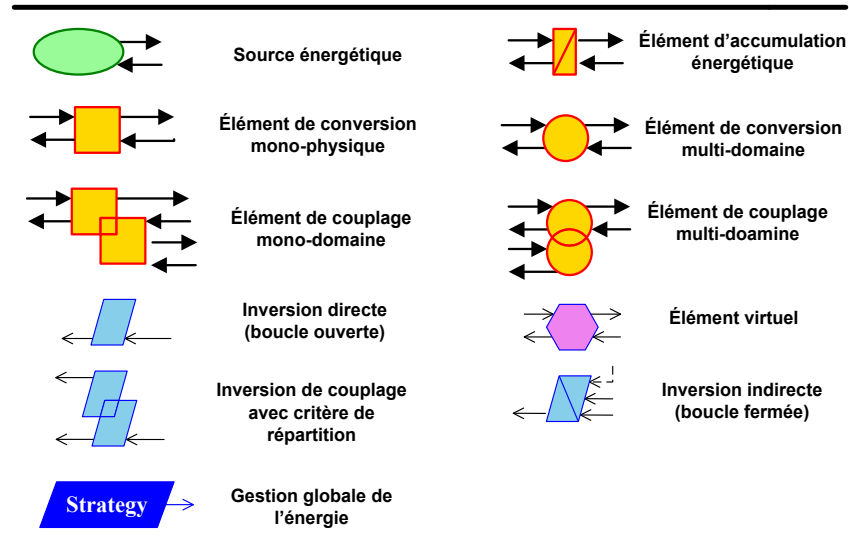


Figure 2-16 commande par inversion indirecte a) Schéma bloc b) REM

Généralement les correcteurs utilisés pour ce type de commande sont de type PI ou IP vu qu'ils assurent la stabilité du système et répondent aussi au critère de rapidité, de précision, de stabilité de dépassement, etc.

Tableau 2-1 Pictogrammes du REM (vert et orange) et de la commande associés (bleu)



2.7 Le véhicule électrique étudié « eCommander »

Une voiture électrique est une automobile mue par la force électromotrice (FEM) d'un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par une batterie d'accumulateurs, une pile à combustible ou un moteur thermique couplé à un générateur électrique. On distingue ainsi les voitures électriques à batterie comme la Tesla Model S, la Tesla Model X et la Renault ZOE, et les voitures électriques à pile à combustible comme la Toyota Mirai ou les voitures hybrides électriques [6]. Il existe également des automobiles électriques équipées de batteries et d'un prolongateur d'autonomie comme la Chevrolet Volt.

Le eCommander est une plateforme qui sert de laboratoire roulant au sein du Laboratoire de recherche e-TESC pour des études avancées des véhicules électriques et hybrides. Cette plateforme est basée sur le châssis du véhicule côte-à-côte de Bombardier Produits Récréatifs (BRP). Elle est munie d'une chaîne de motorisation 100% électrique comprenant une boîte d'engrenages hélicoïdaux silencieuse et à la fine pointe de la technologie [29].

Le véhicule dans sa version initiale est alimenté avec des batteries Acid-Plomb qui peuvent atteindre une vitesse de 40km/h avec une autonomie de 100km. Vu que ces batteries sont denses, nous avons remplacé les batteries Acid-Plomb par des batteries Lithium-Ion.

Tableau 2-2 Spécifications du véhicule eCommander

Variable	Symbole	Valeur	Unités
Masse du véhicule	M	857	kg
Coefficient de frottement	μ_{rr}	0.035	-
Accélération gravitationnelle	g	9.81	m / s^2
Densité d'air à 200 C	ρ	1.185	$kg.m^{-3}$
Vehicle front area	A_f	5.693	m^2
Rayons des roues	R_{wh}	0.315	m
Rapport de transmission de la boîte de vitesse	k_g	20.5	-
Rendement de la boîte de vitesse	η_g	90	%

Tableau 2-3 Machine électrique (Machine asynchrone)

Variable	Symbole	Valeur	Unités
Tension nominale de bus DC	U_{DC_nom}	48	V
Résistance du stator	r_s	1.627	$m\Omega$
Résistance du rotor	r_r	0.415	$m\Omega$
Magnétisation d'inductance	L_m	320	μH
Inductance du stator	L_{ls}	19.42	μH

Inductance rotor	L_{lr}	19.42	μH
Fréquence nominale	f_{nom}	60	Hz
Nombre de paires de pôle	p_p	2	-

Tableau 2-4 Batteries

Variable	Symbole	Valeur	Unités
Capacité cellule	C_{bat_cell}	72	Ah
Tension nominale de la cellule	$v_{bat_cell_nom}$	12	V
Tension nominale de la cellule	$v_{bat_cell_min}$	11.4	V
Résistance équivalente	r_{bat_cell}	3.4	$\text{m}\Omega$
Nombre des cellules en séries	$n_{bat_cell_se}$	4	-
Nombre des branches en parallèle	$n_{bat_cell_pa}$	3	-
Fréquence nominale	f_{nom}	60	Hz
Nombre de paires de pôle	p_p	2	-

Les tableaux ci-dessus présentent les spécifications du eCommander qui seront utilisés ultérieurement pour modéliser notre véhicule étudié.

2.8 Conclusion de la revue de littérature

La figure ci-dessous présente les étapes qui vont être traitées dans les prochains chapitres dans le but de résoudre la problématique de notre sujet. Nous avons commencé avec la modélisation mathématique des composants du système étudié, puis nous sommes passés par la représentation en utilisant la REM en réalisant en parallèle la commande destinée à ce système. Ensuite, nous avons effectué des tests sur ordinateur là où nous avons réalisé des simulations du système à pleine échelle et à échelle réduite. Enfin, nous sommes arrivés à la mise en œuvre d'un banc d'essai pour valider une émulation à échelle réduite pour avoir des simulations à temps réel.

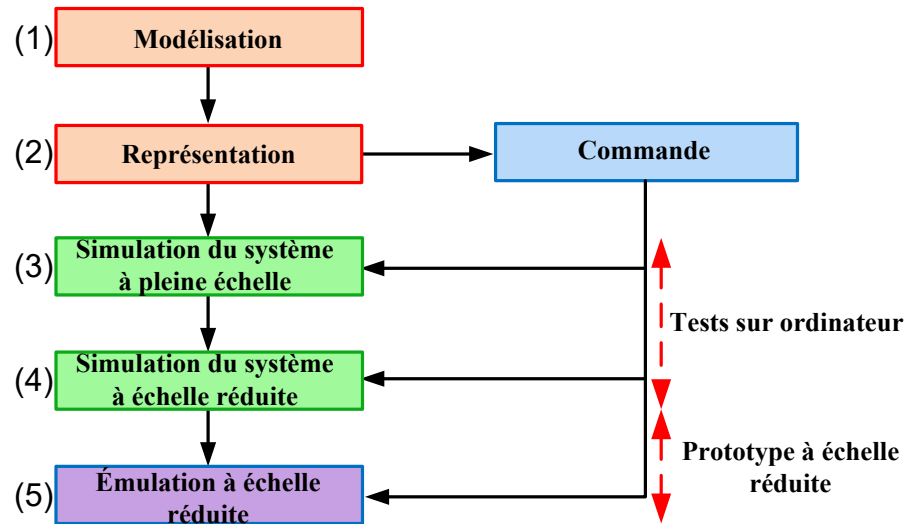


Figure 2-17 Schématisation des étapes à suivre pour résoudre la problématique

Chapitre3 Développement de la REM du véhicule eCommander

La REM du véhicule électrique « eCommander » peut-être développée en utilisant les procédures présentées dans la section 2.2. Dans ce chapitre, nous avons développé la REM du véhicule étudié pour assurer l'implémentation de la simulation dans les prochaines étapes. Pour développer la REM du eCommander, il faut modéliser mathématiquement chaque composant de notre système étudié. Ce processus permet de bien organiser notre REM. La figure 3-1 présente le processus de développement de simulation P-HIL dans cette mémoire.

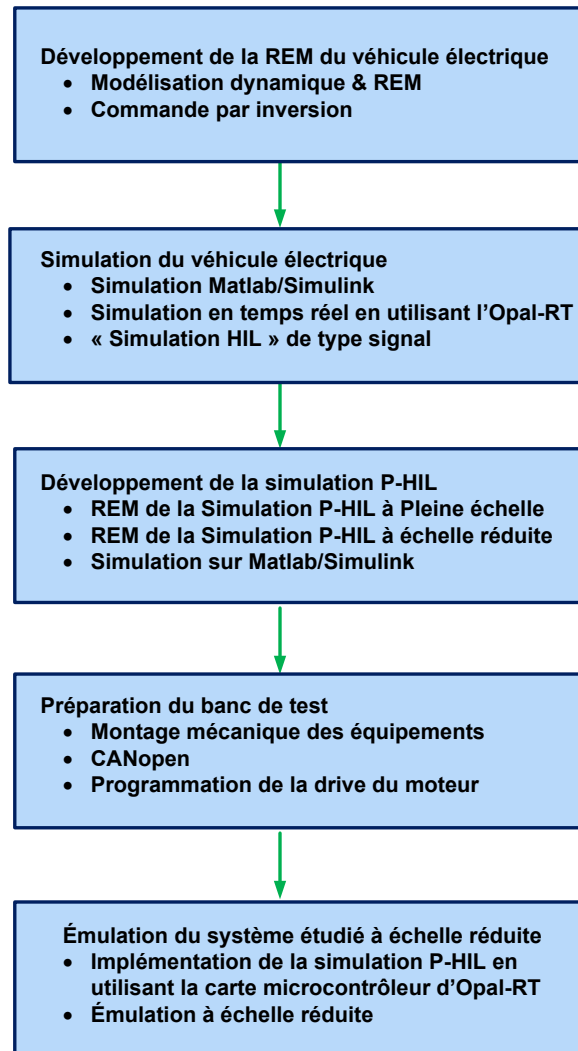


Figure 3-1 Processus de développement de la simulation P-HIL

3.1 Modélisation dynamique et la REM du véhicule eCommander

Comme il a été illustré dans la figure 2-17, la première étape pour résoudre la problématique est de modéliser notre eCommander.

La modélisation et la simulation sont utilisées pour réduire les dépenses et la durée de conception en testant les configurations et les stratégies de gestion d'énergie avant la construction du prototype.

Comme il a été déjà mentionné précédemment, la modélisation dynamique du système étudié est importante et nécessaire pour les prochaines étapes. Les composants sont modélisés séparément avant de les intégrer ensemble. La figure 3-2 présente la topologie de notre système de traction.

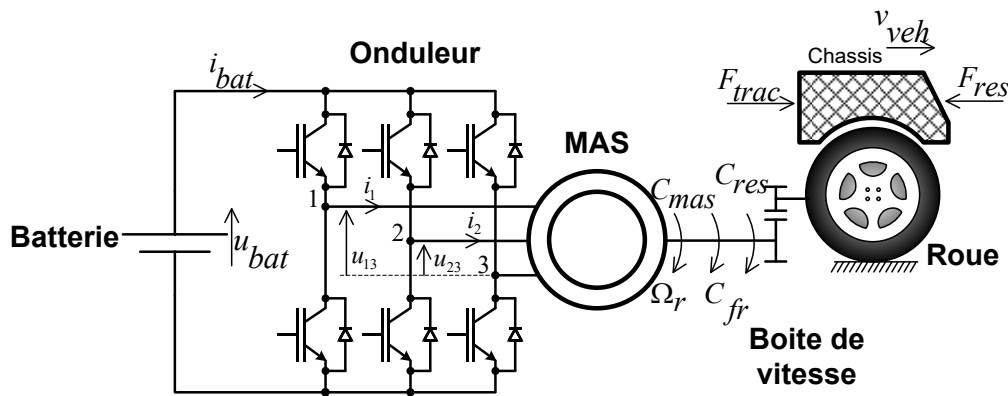


Figure 3-2 Sous-système de traction.

Le sous-système de traction est constitué d'une batterie Li-Ion qui alimente la chaîne de traction par une tension u_{bat} . Un onduleur convertit la tension de bus u_{DC} vers une machine asynchrone (MAS) à cage d'écureuil, qui est couplée à la transmission mécanique du véhicule.

Le couple de MAS (C_{MAS}) est ensuite démultiplié par un réducteur de vitesse, puis distribué aux roues par un différentiel mécanique. Chaque élément du VE peut être modélisé par des relations mathématiques [10] [11].

Batterie

La batterie est une source électrique qui délivre la tension continue u_{bat} pour alimenter le sous-système de traction :

$$\begin{cases} U_{bat} = U_{bat} + r_{bat} i_{bat} \\ U_{OC} = U_{SOC} = U_{bat-init} - \frac{1}{C_{eq}} \int i_{bat} dt \end{cases} \quad (3.1)$$

Où

u_{bat}	Tension de la batterie
r_{bat}	Résistance interne de la batterie
i_{bat}	Courant de la batterie
u_{soc}	État de charge de la batterie
$u_{bat-init}$	Tension initiale de la batterie
C_{eq}	Capacité équivalente utilisable de la batterie

Onduleur de tension

Le modèle de l'onduleur utilise les concepts de fonctions de connexion et des fonctions de modulation. Les interrupteurs de l'onduleur sont alors modélisés de façon statique, en fonction de leurs états [30].

$$\begin{cases} u_{ond} = m_{ond} u_{DC} \\ i_{DC} = m_{ond}^T i_{mas} \end{cases} \quad (3.2)$$

Tel que :

$$u_{ond} = \begin{bmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{bmatrix}; i_{mas} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}; m_{ond} = \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Où

\underline{u}_{ond}	Vecteur de la tension de l'onduleur
u_{13}, u_{23}	Tension composée de l'onduleur
\underline{i}_{em}	Vecteur courant de la machine électrique
i_1, i_2	Courants de l'onduleur et de la machine électrique
\underline{m}_{ond}	Vecteur de modulation
m_{13}, m_{23}	Rapport de modulation de l'onduleur

Machine asynchrone :

Le eCommander se compose d'une machine asynchrone triphasée à deux paires de pôles, son stator contient trois phases (a, b et c) et qui sont connectées en triangle avec les trois phases d'alimentation de l'onduleur. Son rotor à cage d'écureuil est constitué quant à lui, de barreaux conducteurs en court-circuit. Le rotor crée un champ magnétique qui tourne à la vitesse de synchronisme $\Omega_s = 2\pi f / p$. Le champ tournant se répartit dans l'entrefer qui présente la partie vide entre le rotor et le stator et qui aide à éviter les pertes de flux par la création d'un courant induit dans le circuit fermé du rotor. Une force électromotrice s'oppose au champ tournant ce qui fait tourner le rotor. Le rotor tourne alors à une vitesse inférieure à la vitesse du champ tournant[31] [32]. La machine asynchrone est modulée dans un cadre rotatif d-q.

Transformation : La conversion des tensions et des courants aux variables d-q :

$$u_{dq} = [T_R(\theta_{d/s})][T_C][T_{Line}]u_{inv} \quad (3.4)$$

$$i_{mas} = [T_R(\theta_{d/s})^{-1}][T_C^{-1}]i_{dq} \quad (3.5)$$

Où :

- $\underline{u}_{dq} = [u_{ds} \ u_{qs}]^T$, d et q sont les axes statoriques de la machine concernant la tension.
- $\underline{i}_{dq} = [i_{ds} \ i_{qs}]^T$, d et q sont les axes statoriques concernant le courant.
- $[T_R(\theta_{d/s})]$, $[T_C]$, $[T_R(\theta_{d/s})^{-1}]$, $[T_C^{-1}]$ sont respectivement les matrices de rotation et les matrices de Clarke et leurs inversions.

T_{line} est la matrice de transformation des tensions. Ces matrices sont comme suit :

$$[T_R(\theta_{d/s})] = \begin{bmatrix} \cos \theta_{d/s} & \sin \theta_{d/s} \\ -\sin \theta_{d/s} & \cos \theta_{d/s} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[T_C] = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[T_R(\theta_{d/s})^{-1}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_{d/s} & -\sin \theta_{d/s} \\ \sin \theta_{d/s} & \cos \theta_{d/s} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$[T_R(\theta_{d/s})^{-1}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_{d/s} & -\sin \theta_{d/s} \\ \sin \theta_{d/s} & \cos \theta_{d/s} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$[T_C^{-1}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$[T_{line}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

Tel que $\theta_{d/s}$ l'angle entre l'axe q et le repère fixe du stator.

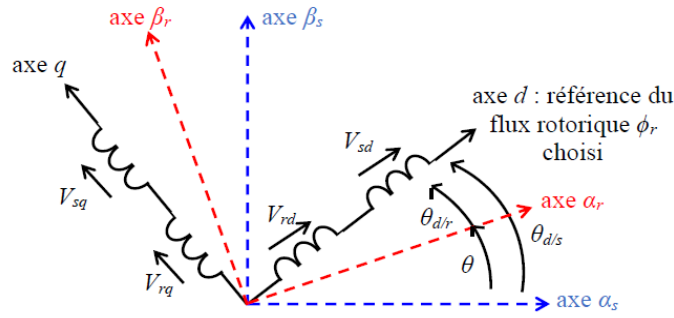


Figure 3-3 Repères $d - q$ et $\alpha - \beta$ de référence

Armatures d-q:

La machine est modélisée en utilisant les variables dans les axes $d - q$ [33][34]:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_{d/s} \sigma L_s i_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{qs} - \omega_{d/s} \sigma L_s i_{ds} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} \end{cases} \quad (3.12)$$

σ est défini par la relation suivante :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (3.13)$$

Pour simplifier les relations (3.12) et (3.13), nous les avons écrits de la manière suivante :

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{ds} + e_{ds} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{qs} + e_{qs} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} e_{ds} = -\omega_{d/s} \sigma L_s i_{qs} \\ e_{qs} = \omega_{d/s} \sigma L_s i_{ds} + \omega_{d/s} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} \end{cases} \quad (3.16)$$

Où

R_s	Résistance statorique
R_r	Résistance rotorique
L_s	Inductance statorique
L_r	Inductance rotorique
L_m	Inductance mutuelle
e_{ds}, e_{qs}	Force électromotrice

Conversion électromagnétique et électromécanique :

Cette conversion inclut la magnétisation du rotor et le couplage des variables électrique, magnétique et mécanique.

La relation de magnétisation du rotor est considérée linéaire en négligeant la saturation et les effets hystérésis.

$$L_m i_{ds} = \lambda_{dr} + \frac{L_r}{R_r} \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (3.17)$$

Généralement, le couple électromagnétique est donné comme suit ;

$$C_{em} = \frac{3}{2} p_p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (3.18)$$

Où λ_{dr} sont les flux de rotor sur l'axe d λ_{qr} et le flux de rotor sur l'axe q , p_p le nombre de paires de pôles.

Puisque $\lambda_{qr} = 0$ (flux de rotor sur l'axe q), l'équation du couple électromagnétique devient :

$$C_{mas} = \frac{3}{2} p_p \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{qs} \quad (3.19)$$

L'expression de glissement est la suivante :

$$\omega_{d/r} = \omega_{d/s} - p_p \Omega_r = \frac{R_r}{L_r} \frac{L_m}{\lambda_{dr}} i_{qs} \quad (3.20)$$

L'angle de rotation synchrone est obtenu par la relation suivante :

$$\theta_{d/s} = \int \omega_{d/s} dt \quad (3.21)$$

Frein mécanique et transmission :

Le frein mécanique est considéré comme une source mécanique couplée avec le rotor du MAS. Pour la simplification, nous considérons la réponse de couple de freinage comme référence sans délai :

$$C_{fr} = C_{fr-ref} \quad (3.22)$$

L'élément du couplage lie le couple de MAS et le couple du frein mécanique :

$$\begin{cases} \Omega_r commune \\ C_{tot} = C_{mas} - C_{fr} \end{cases} \quad (3.23)$$

Transmission mécanique : La machine électrique est connectée avec une structure mécanique qui se compose d'un arbre de transmission, d'une boîte de vitesse, d'un différentiel et des roues.

$$\begin{cases} F_{trac} = k_{tran} \eta_{tran}^k C_{tot} \\ \Omega_r = k_{tran} v_{veh} \end{cases} \text{ avec } k = \begin{cases} 1 & \text{si } F_{trac} v_{veh} \geq 0 \\ -1 & \text{si } F_{trac} v_{veh} < 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

F_{trac}	Force de traction
k_{tran}	Rapport de transmission
η_{tran}	Rendement de transmission
v_{veh}	Vitesse du véhicule

Châssis et environnement :

Le châssis de la voiture possède une masse équivalente M_{tot} . Cette masse contient la masse du véhicule et la masse équivalente de la partie tournante. Un frein mécanique génère une force de freinage positive F_{fr} en fonction du cycle de conduite et suivant une stratégie de gestion d'énergie. On considère que cette force est additionnée à la force de l'environnement pour

obtenir la force résistive F_{res} . Donc suivant la seconde loi de Newton, on peut définir la vitesse du véhicule V_{ve} en fonction des forces de transmission F_{trans} et résistives F_{res} de l'environnement [32].

$$M_{tot} \frac{d}{dt} v_{ve} = F_{trans} - F_{res} \quad (3.25)$$

$$F_{res} = f_r M_{tot} g + 0.5 \rho c_x a (v_{ve} + v_{vent})^2 + M_{tot} g \alpha + F f \quad (3.26)$$

M_{tot}	Masse totale du véhicule
F_{trans}	Force de transmission
F_{res}	Force résistive
v_{vent}	Vitesse du vent
f	Coefficient de frottement
g	Accélération due à la gravité
α	Pente
ρ	Masse volumique
c_s	Coefficient de traînée d'air
A	Surface de frottement frontale

Après la définition mathématique des composants du eCommander, nous allons passer à l'étape de simulation où nous avons développé un programme de simulation avec le logiciel Matlab/Simulink et dans lequel on trouve une variété d'outils que nous pouvons utiliser.

Parmi ces outils, on trouve la représentation énergétique macroscopique (REM). La REM nous permet de définir une organisation synthétique et graphique d'une modélisation mathématique pour les systèmes complexes et adaptables à d'autres systèmes (figure 3-4) peu importe leurs complexités. C'est pour cela que nous avons choisi l'utilisation de cet outil pour la suite de notre travail.

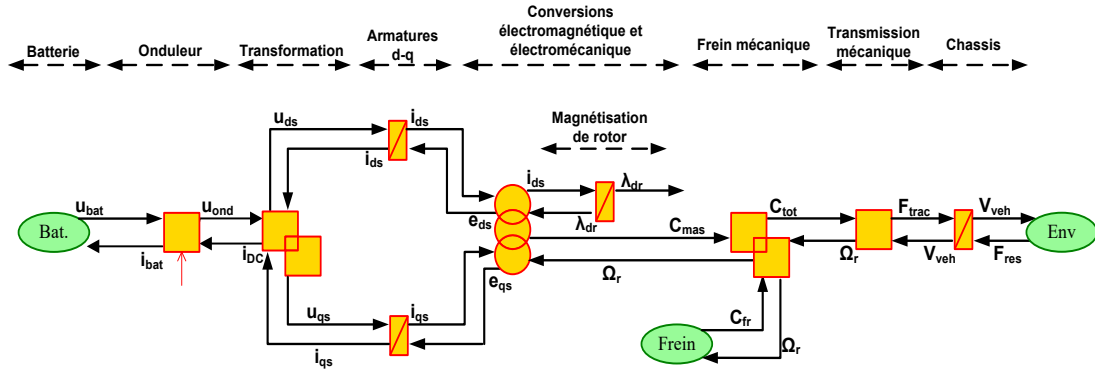


Figure 3-4 REM du sous-système de traction du système étudié

3.2 Commande du véhicule eCommander :

Après la définition de la REM du système étudié, la prochaine étape selon la schématisation présentée par la figure 3-1 est de développer la commande de notre véhicule.

3.2.1 Structure de commande par inversion

La structure de commande est déduite de manière systématique par l'inversion de la REM. Cette structure est construite par la définition des objectifs de la commande et l'identification des variables de réglage. Pour former une chaîne de réglage, les variables à contrôler sont reliées aux entrées de réglage (figure 3-5).

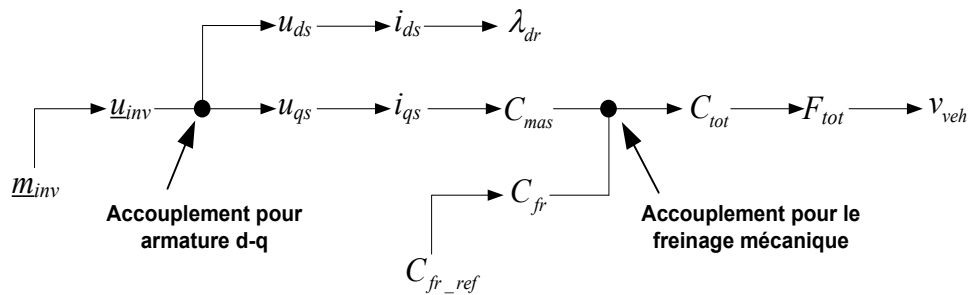


Figure 3-5 Chaîne de réglage

Comme présenté précédemment, la chaîne de commande est obtenue par l'inversion de la chaîne de réglage à la manière d'un « effet miroir ».

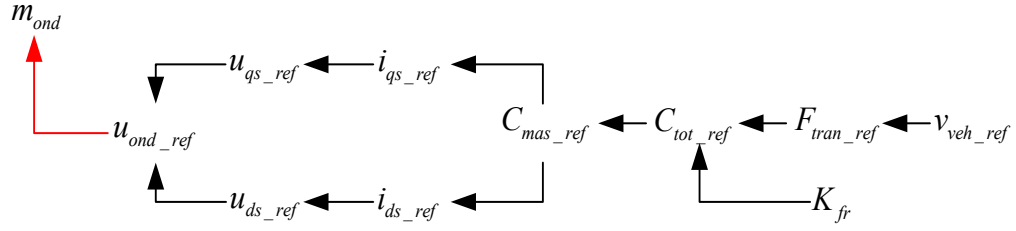


Figure 3-6 Chaîne de commande de la traction

Inversion du châssis :

Le premier élément qui peut être inversé est le châssis qui est un élément d'accumulation car il accumule de l'énergie cinétique. Un correcteur en boucle fermée tel qu'un correcteur PI est requis pour cette inversion. À partir de la vitesse référence $v_{veh-ref}$, de la vitesse mesurée $v_{veh-meas}$ et de la mesure de la force résistive $F_{res-meas}$, la force de traction référence $F_{trac-ref}$ est déduite de la relation suivante :

$$F_{trac-ref} = C_{v_{veh}}(t) [v_{veh-ref} - v_{veh-meas}] + F_{res-meas} \quad (3.27)$$

où $C_{v_{veh}}$ est un correcteur de type PI, sachant qu'aucune règle ne spécifie le type de ce correcteur, qui peut être de type proportionnel, proportionnel intégral ou autre.

Inversion de la transmission mécanique :

La transmission mécanique est un élément de conversion qui n'accumule pas de l'énergie. Donc, la relation (3.24) est inversée de façon directe (en boucle ouverte) pour déduire la force. $F_{trac-ref}$

$$C_{tot-ref} = \frac{F_{trac-ref}}{k_{tran} \eta_{tran}^k} \quad (3.28)$$

Inversion du couplage du frein mécanique :

L'accouplement du freinage mécanique est un élément d'accouplement de collecte. Cet élément collecte le couple électrique de la machine et le couple du freinage mécanique pour donner le couple total. L'inversion directe de cet élément répartit la référence du couple total en références de machine et en couple du freinage :

$$\begin{cases} C_{mas-ref} = k_{fr} C_{tot-ref} \\ C_{fr-ref} = (1 - k_{fr}) C_{tot-ref} \end{cases} \quad (3.29)$$

où K_{fr} est un facteur de distribution qui vient du bloc de stratégie du freinage.

Inversion du rotor de magnétisation :

Une inversion indirecte est nécessaire pour le rotor de magnétisation vu qu'il s'agit d'un élément d'accumulation et vu qu'il accumule de l'énergie cinétique.

$$i_{ds-ref} = C_{flux}(t) [\lambda_{dr-ref} - \lambda_{dr-meas}] \quad (3.30)$$

où λ_{dr-ref} proviens d'une stratégie de flux. En raison de la dynamique de premier ordre de la magnétisation, le correcteur choisi est le correcteur proportionnel intégral (PI).

Inversion du couplage multi-physique :

Il s'agit d'un élément de couplage, ce qui permet de réaliser une inversion :

$$\begin{cases} i_{ds} \\ i_{qs-ref} \end{cases} = \frac{T_{em-ref}}{\frac{3}{2} p_p \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr-meas}} \quad (3.31)$$

Inversion des armatures d-q :

Pour cette inversion, nous avons utilisé une inversion indirecte ce qui demande d'utiliser un correcteur PI :

$$\begin{cases} u_{ds-ref} = C_{i_d}(t) [i_{ds-ref} - i_{ds-meas}] + e_{ds-meas} \\ u_{qs-ref} = C_{i_q}(t) [i_{qs-ref} - i_{qs-meas}] + e_{qs-meas} \end{cases} \quad (3.32)$$

où $C_{i_d}(t)$ $C_{i_q}(t)$ sont des contrôleurs à boucle fermée de type PI.

Inversion de la transformation de Park :

L'inversion des transformations est réalisée de la manière suivante:

$$u_{ond-ref} = \begin{bmatrix} T_{line}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_C^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_R(\theta_{d/s-meas})^{-1} \end{bmatrix} u_{dq-ref} \quad (3.33)$$

Inversion de l'onduleur :

L'onduleur est un élément de conversion à multi-entrées. Pour inverser ce type d'élément, nous devons choisir une entrée comme variable de référence. Pour les autres entrées, il faut les considérer comme des perturbations.

$$m_{ond} = \frac{u_{ond-ref}}{u_{DC-meas}} \quad (3.34)$$

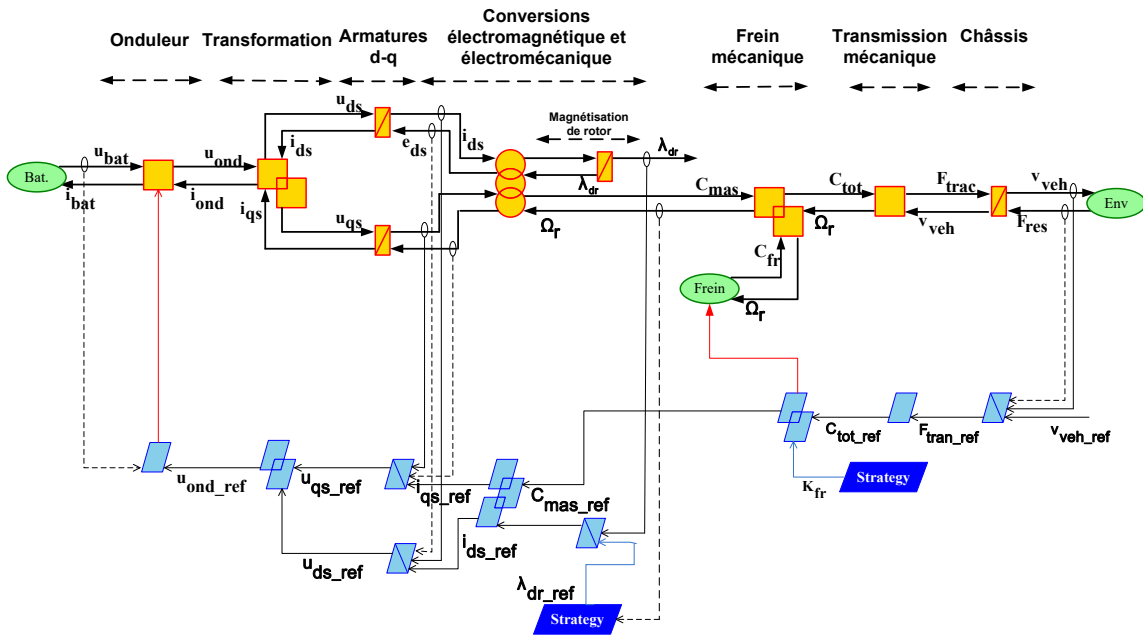


Figure 3-7 SMC issue de l'inversion de la REM du sous-système de traction

Comme mentionné précédemment, les règles d'inversion ne définissent pas le type du correcteur. Donc la nature du correcteur est sélectionnée selon les performances désirées.

La commande de notre système contient quatre inversions indirectes comme il a été présenté dans la figure 3-7. De ce fait, nous avons utilisé quatre correcteurs de la forme suivante :

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3.35)$$

La synthèse des correcteurs et définition des coefficients sont décrits dans l'« Annexe A ».

3.2.2 Structure pratique de la commande du véhicule eCommander :

La SMC (figure 3.7) est unique pour chaque système et pour chaque objectif de commande. La procédure de conception est systématique et simple. Cependant, la SMC n'est qu'un schéma de commande théorique avec l'hypothèse que toutes les variables peuvent être mesurées. En pratique, un certain nombre de variables sont impossibles ou difficiles à mesurer. De plus, certaines mesures peuvent être négligées. Les simplifications et les estimations des variables non mesurables mènent à ce qu'on appelle la structure de contrôle pratique (PCS) figure 3-8.

Pour réaliser la commande du sous-système, théoriquement il est nécessaire d'avoir 8 capteurs pour mesurer les variables (F_{res} , v_{veh} , λ_{dr} , i_{ds} , i_{qs} , e_{ds} , e_{dq} , u_{ond}). Cependant, dans la pratique, certaines variables ne sont pas mesurables. En fonction des correcteurs, il existe des mesures qui ne sont pas obligatoires, par exemple la force résistive F_{res} .

La mesure des variables énergétiques est indispensable pour renfermer les boucles de commande. Afin de pouvoir définir ces mesures, des estimations sont possibles.

Les courants i_{ds-est} et i_{qs-est} sont estimés à partir des courants mesurés et de la transformée de Park. De la même façon, l'angle de rotation synchrone $\theta_{d/s}$ et la force électromotrice sont estimés suivant les relations (3.17) et (3.20).

La figure 3-8 présente la Structure Pratique de Commande issue de l'inversion de la REM du sous-système de traction. Pour réaliser cette structure, nous avons implémenté des nouveaux blocs d'estimation qui ont la couleur violette. Ces blocs d'estimation permettent d'estimer les valeurs des variables qui ne sont pas mesurables.

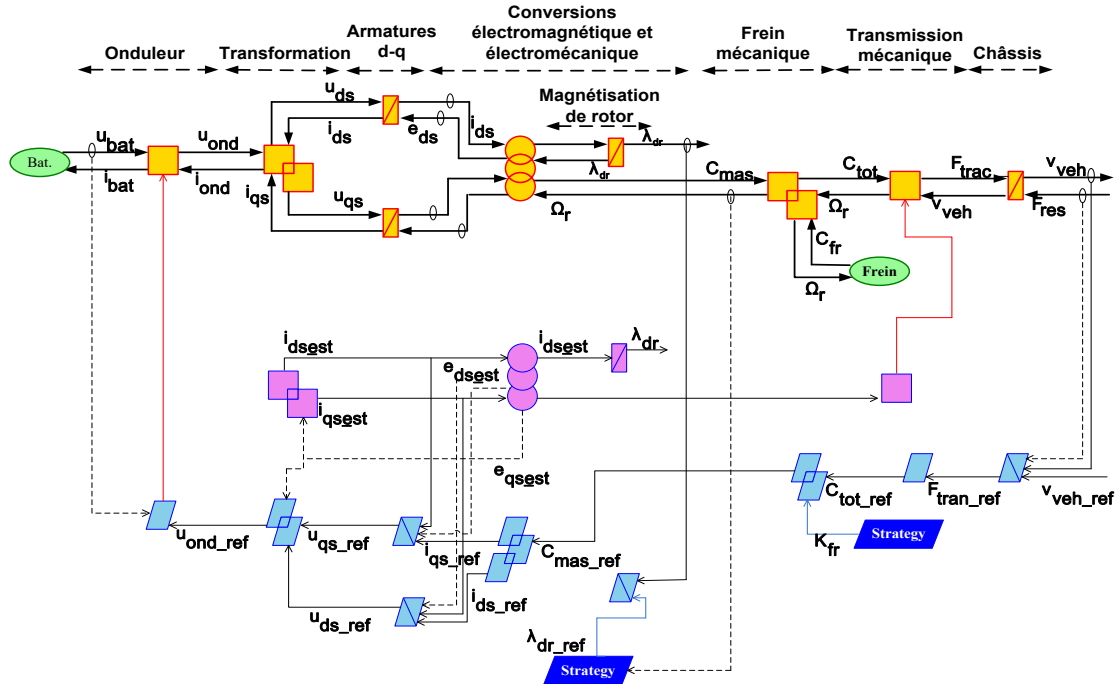


Figure 3-8 Structure Pratique de Commande issue de l'inversion de la REM du sous-système de traction

3.3 Résultat de la simulation du véhicule eCommander :

L'environnement de test a été développé sous le logiciel « Matlab/Simulink » (figure 3-9). La commande appliquée au sous-système est déduite de l'inversion de la REM et a été testée sur le cycle de référence NEDC « *New European Driving Cycle* ». Ce dernier est destiné à déterminer la consommation et l'autonomie d'un véhicule ou d'un utilitaire léger. Le cycle NEDC se compose de trois phases de vitesse (figure 3-10).

Les résultats obtenus après la simulation sont présentés dans les figures ci-dessous. La figure 3-10 présente la vitesse du véhicule, nous constatons que véhicule suit parfaitement la référence donnée.

Dans le but de simplifier notre simulation, nous avons gardé une tension de batterie qui varie entre 47V et 48V (pas de déchargement (figure 3-11)).

La figure 3-13 présente successivement le couple, la vitesse de rotation et la puissance mécanique de la machine de traction. D'après ces simulations, nous constatons que le couple et la vitesse de rotation suivent la référence parfaitement et que la puissance mécanique est proportionnelle à la variation de ces deux paramètres.

La figure 3-14 présente les courants au niveaux des armatures d-q. On constate que le courant i_{qs} suit parfaitement la référence i_{qs-ref} . De même, pour le courant i_{ds} et la référence i_{ds-ref} .

Pour le flux de la machine asynchrone, la figure 3-15 montre que le flux du rotor et le modèle du flux suivent la stratégie donnée.

La figure 3-16 présente le courant de phase de la machine de traction où on peut constater dans la deuxième fenêtre parfaitement les oscillations.

La figure 3-17 présente les variations de la tension ligne-ligne de l'onduleur. On constate que cette dernière varie suivant l'accélération et la décélération de notre système étudié.

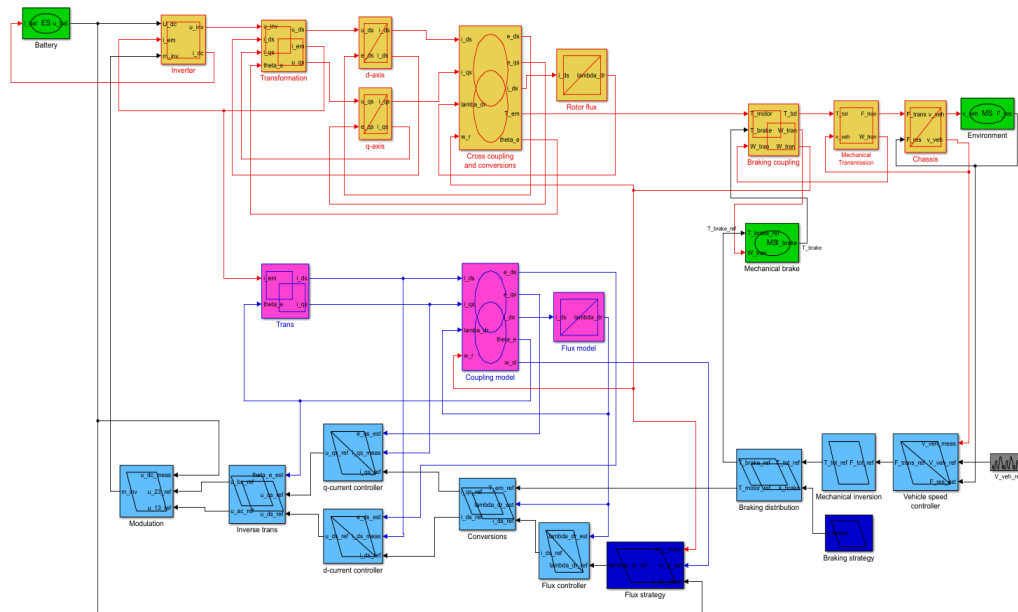


Figure 3-9 Simulation du véhicule eCommander (Matlab/Simulink)

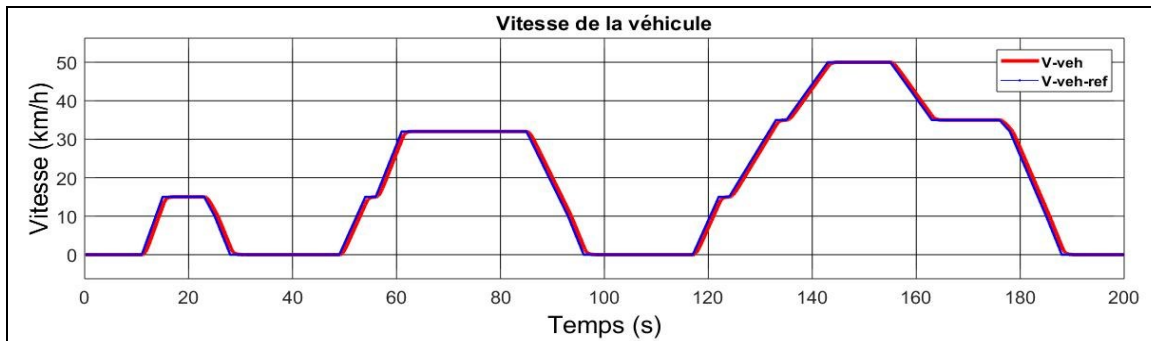


Figure 3-10 La vitesse du véhicule

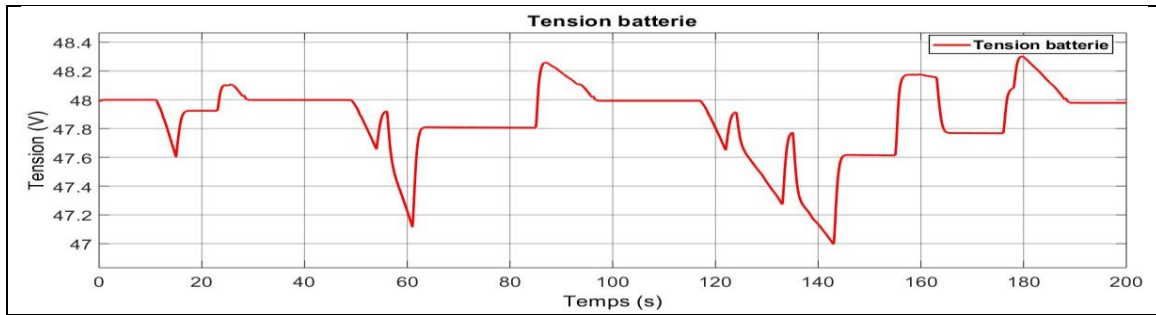


Figure 3-11 Tension de la batterie

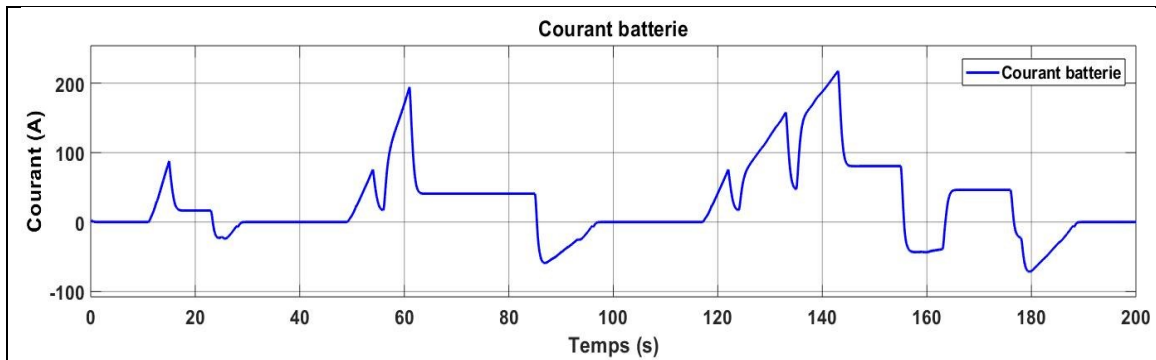
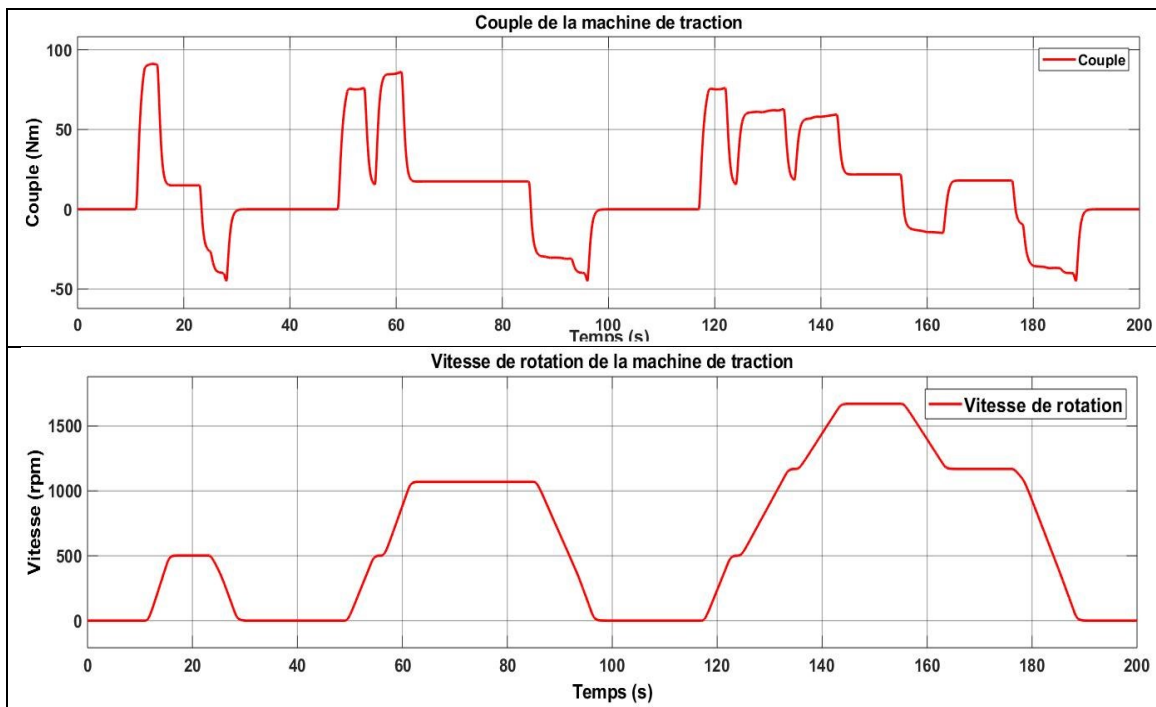


Figure 3-12 courant de la batterie



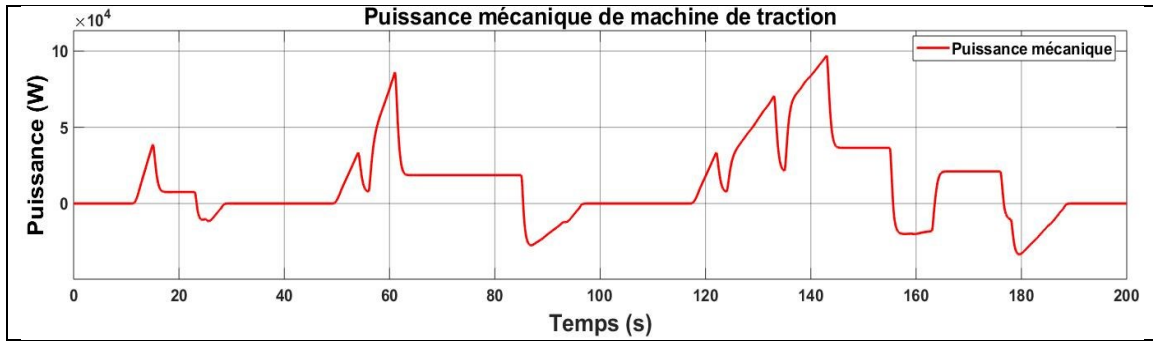


Figure 3-13 Couple, vitesse et puissance mécanique de la machine de Traction

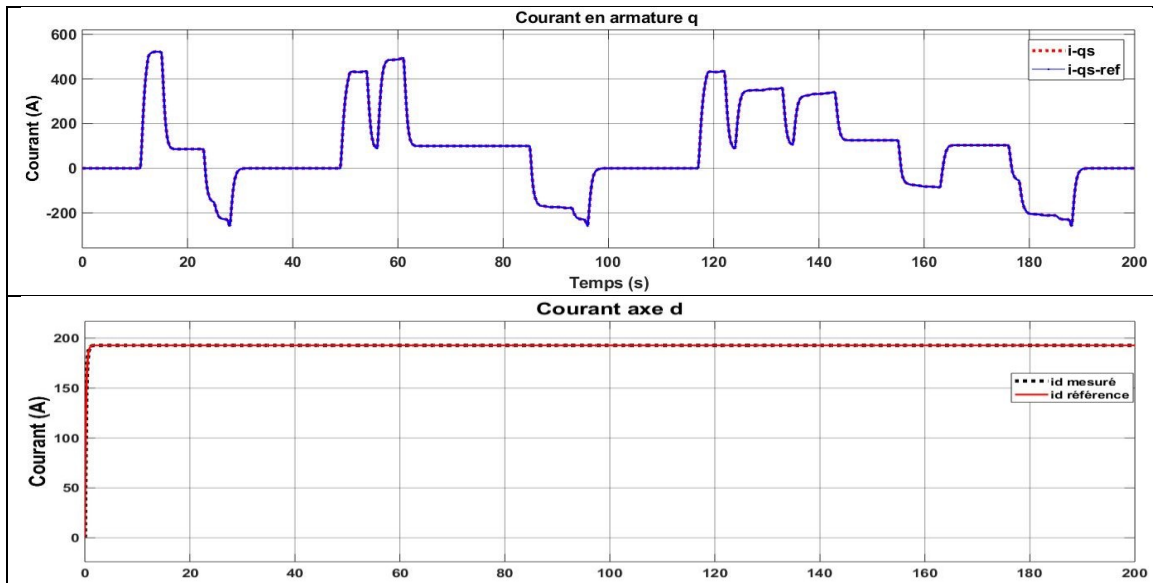


Figure 3-14 Courant des armatures d-q de la machine de traction

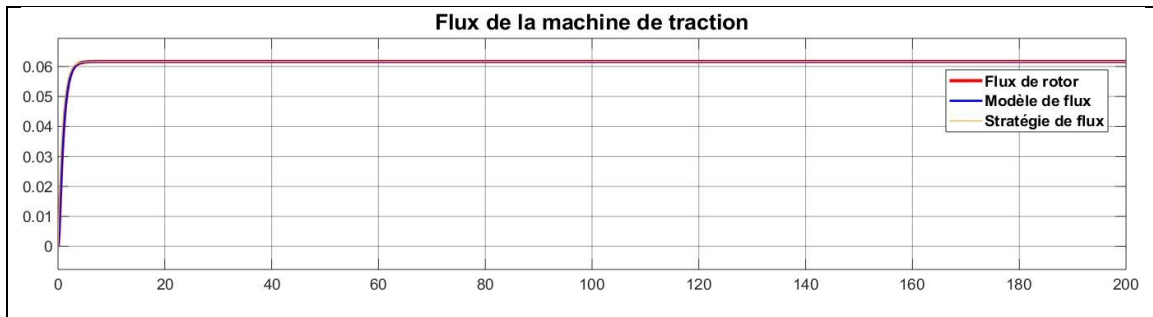


Figure 3-15 Flux de la machine de traction

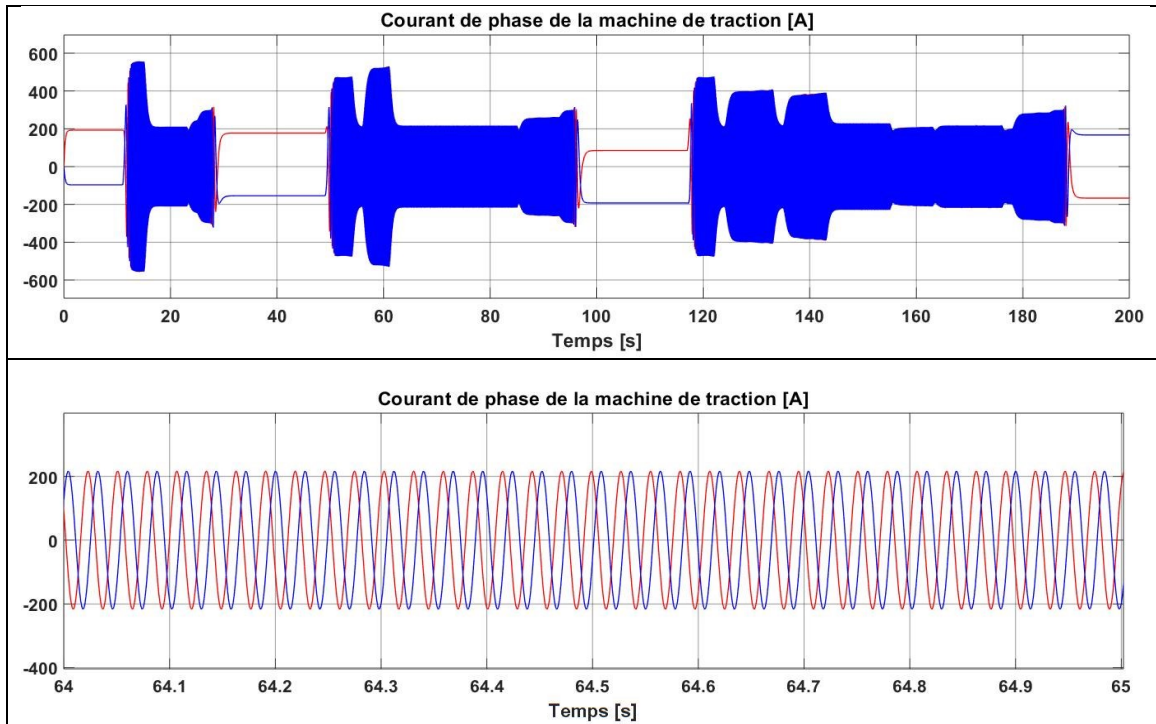


Figure 3-16 courant de phase de la machine de traction

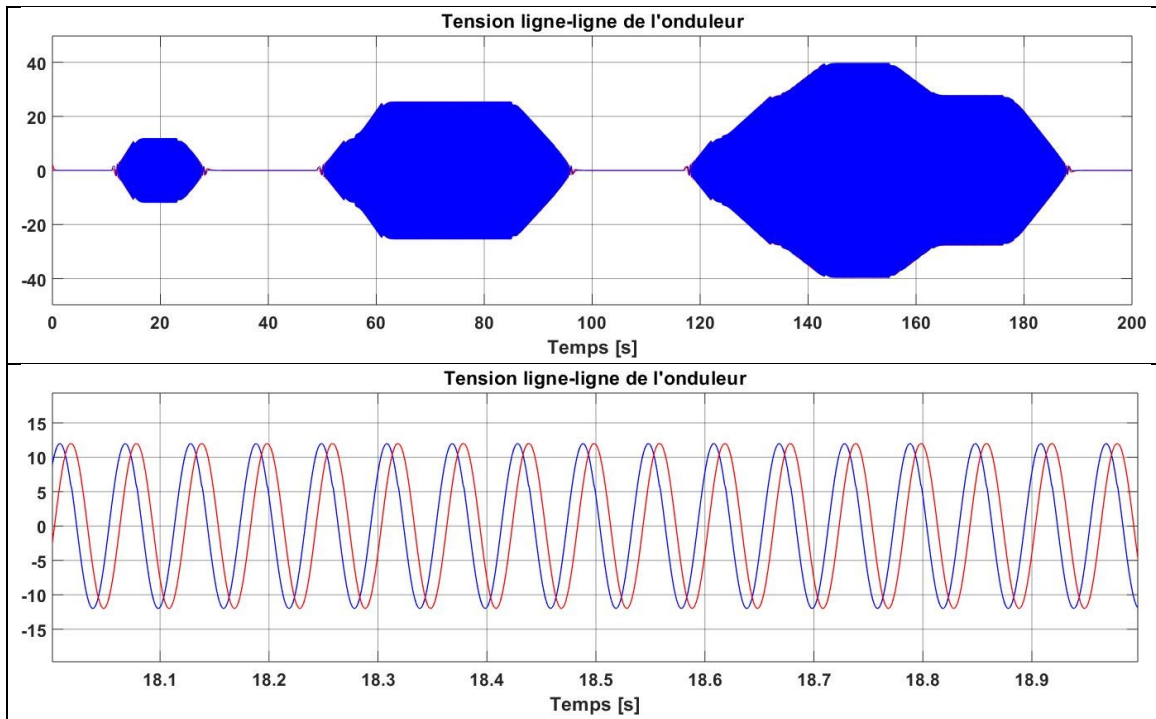


Figure 3-17 Tension ligne-ligne de l'onduleur

3.4 Conclusion :

La modélisation dynamique de composants du véhicule est primordiale pour le dimensionnement de ces derniers. Cette modélisation nous a permis de simuler notre système et de vérifier la réponse de ses composants sur un cycle de conduite bien défini. Notre véhicule a été représenté en utilisant le formalisme REM qui permet de décrire graphiquement les systèmes énergétiques.

La REM nous a permis également de décomposer le système étudié en éléments en interaction. Pour la commande, la chaîne de réglage a été inversée pour obtenir une chaîne de commande. Suivant la chaîne de commande et par inversion de la REM, la structure maximale de commande a été construite. Finalement, cette structure a été implémentée sous le logiciel Matlab/Simulink dans le but de vérifier le comportement de ses composants.

La simulation à pleine échelle du notre système étudié présente une simulation purement numérique. Cette Simulation présente une étape importante vu qu'elle permet de vérifier le bon dimensionnement et la compatibilité des équipements avant l'implémentation dans un système réel.

Pour effectuer une simulation à échelle réduite, nous avons réalisé un autre type de simulation qui s'appelle simulation HIL de type puissance. Cette dernière se divise elle-même en deux types de simulation, une simulation à pleine échelle et une simulation à échelle réduite. Ces types de simulation seront dévoilés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 Implémentation de la « Simulation P-HIL »

La simulation P-HIL représente un outil flexible et performant pour la conception et le prototypage rapide. Vu que cet outil permet d'approcher au plus près des conditions réelles de fonctionnement des équipements, ce chapitre étend ce concept à la simulation P-HIL. L'organisation d'une telle simulation est expliquée dans la première partie de ce chapitre.

4.1 Organisation de la simulation HIL :

Dans le but de réaliser une simulation HIL, notre système a été divisé en deux parties. La première partie "**Sous-système de traction**" qui est composée d'une machine électrique, une électronique de puissance et une source d'alimentation. La deuxième partie "**Sous-système qui émule l'environnement**" qui est composée elle aussi d'une machine électrique, une électronique de puissance et une source d'alimentation.

Les variables entre les deux sous-systèmes sont le couple C_{MAS} et la vitesse de rotation Ω_r . La figure 4-1 montre la décomposition du système en deux parties.

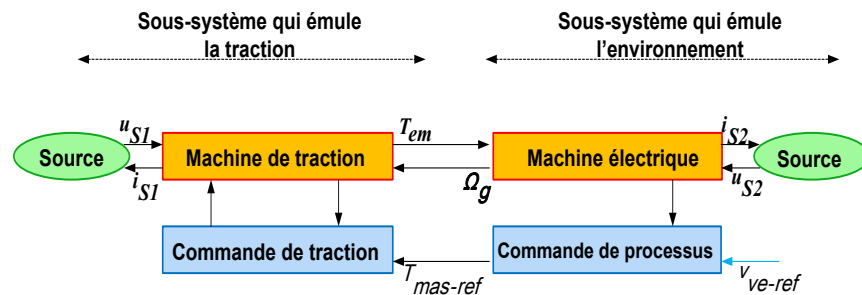


Figure 4-1 Décomposition du système étudié

Dans l'ordre de coupler les deux sous-systèmes, un système d'interface est nécessaire pour imposer les bonnes interactions entre les deux parties. Cette interface doit :

- 1) Accepter le couple en entrée.
- 2) Délivrer la vitesse de rotation en sortie.

Pour avoir ces conditions, une autre machine électrique va être utilisée comme une interface. La figure 4-2 présente l'organisation de HIL pour un tel système. Le couple est pris de la machine asynchrone (machine de traction), et la vitesse de rotation résistive est calculée en utilisant le modèle. Enfin, la vitesse est envoyée au sous-système d'émulation sous forme d'une référence.

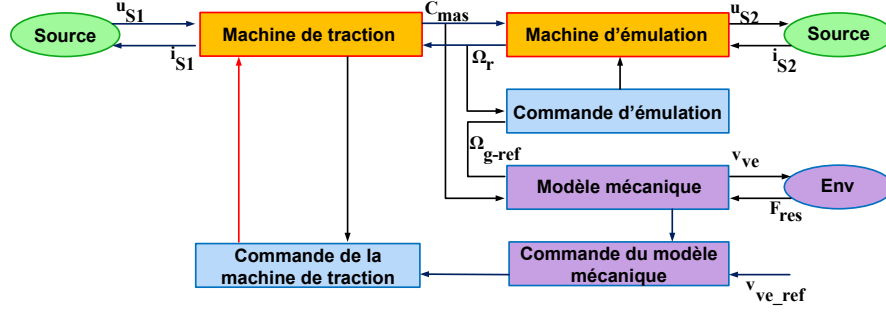


Figure 4-2 Organisation de la simulation HIL

4.2 REM et « Simulation HIL » à pleine échelle :

Pour réaliser une simulation HIL à pleine échelle, un programme de simulation doit être développé sous le logiciel Matlab/Simulink. Cette simulation nous a permis de vérifier le comportement global du système étudié. La simulation HIL exige de réaliser une connexion mécanique entre la MAS qui émule la traction du eCommander et la MSAP qui émule l'environnement du conducteur. Cette méthode nous aide à vérifier si la commande des deux machines répond à nos besoins avant de passer à la simulation à échelle réduite.

Couplage mécanique :

Le couplage mécanique sert à connecter les deux machines d'émulation (accouplement mécanique). Ces deux machines partagent la même vitesse de rotation et dépendent de la simulation du modèle de la transmission mécanique. L'arbre mécanique impose sa vitesse de rotation Ω_g suivant les couples de la MAS « C_{mas} » et le couple de la MSAP « C_{MSAP} ».

$$J_{arbre} \frac{d}{dt} \Omega_g = C_{mas} - C_{MSAP} - f_{arbre} \Omega_{arbre} \quad (4.1)$$

On néglige la dynamique de la machine d'émulation d'une manière que le couple de la machine C_{MSAP} soit égal à la référence $C_{MSAP_ref} \cdot i_L(t)$ représente le courant produit par l'onduleur.

$$\begin{cases} C_{MSAP}(t) = C_{MSAP_ref}(t) \\ i_L(t) = \frac{\eta_L^m C_{MSAP}(t) \Omega_g(t)}{u_{source}} \end{cases} \quad (4.2)$$

L'arbre du moteur de traction et l'arbre de machine d'émulation de l'environnement sont accouplés mécaniquement en utilisant une seule relation.

$$C_{MAS}(t) - C_{MSAP}(t) = J_{tot} \frac{d}{dt} \Omega_g(t) + f_{tot} \Omega_g(t) \text{ avec } J_{tot} = J_{MAS} + J_{MSAP} \text{ et} \quad (4.3)$$

$$f_{tot} = f_{mas} + f_{MSAP}$$

où J_{mas} est l'inertie de la machine de traction, J_{MSAP} est l'inertie de la machine de charge, f_{mas} est le coefficient de friction de la machine de traction et f_{MSAP} est le coefficient de friction de la machine de charge.

En utilisant cette relation, on peut commander cette machine en boucle fermée.

$$C_{MSAP_ref}(t) = C_j(t) [\Omega_{MSAP_ref}(t) - \Omega_{MSAP_mes}(t)] + C_{mas_mes}(t) \quad (4.4)$$

Simulation de la transmission :

Tout d'abord il faut étudier les modèles de la machine asynchrone et les parties mécaniques du eCommander (présentés dans la figure 3-8). La simulation de la transmission est réalisée dans la carte microcontrôleur. L'estimation du C_{mas} est établie au modèle de la transmission du système étudié qui de sa part réagit en reproduisant une vitesse de référence à la machine synchrone à aimant permanent de charge. De ce fait, nous avons reproduit le comportement du eCommander.

Machine synchrone de charge :

La machine synchrone à aimant permanent (MSAP) est bien connue comme la plus appropriée pour les véhicules électriques.

La pulsation électrique rotorique « ω » de la MSAP est similaire à la pulsation statorique « $\omega_{d/s}$ ». Le modèle dynamique électrique de la MSAP est bien connu dans une trame synchrone en rotation d – q qui est exprimé comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Phi \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Dans ce modèle, chaque tension est composée de trois parties: le terme autodynamique « $R + sL_d, q$ », le terme du couplage « $\pm \omega_e L_{d,q}$ » et la force contre-électromotrice « $\omega_e \Phi$ ». Le couple électromagnétique représente la somme du couple mutuel et du couple réductant :

$$C = \frac{3p_p}{2} [\Phi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4.6)$$

La REM de la simulation HIL de type puissance peut être développée en utilisant les mêmes principes lors du développement du eCommander. La machine de charge est représentée par un élément de conversion puisqu'elle n'accumule pas d'énergie. La représentation concernant la simulation HIL est dévoilée sur la figure 4-3.

L'élément de conversion qui présente la machine asynchrone contient : l'élément de conversion qui présente l'onduleur, la transformation qui est présentée par l'élément de couplage mono-domaine, l'armature d-q par l'élément d'accumulation, l'élément de conversion électromagnétique et électromécanique, et l'élément de magnétisation rotorique. Cette partie est présentée sur la figure 3-8.

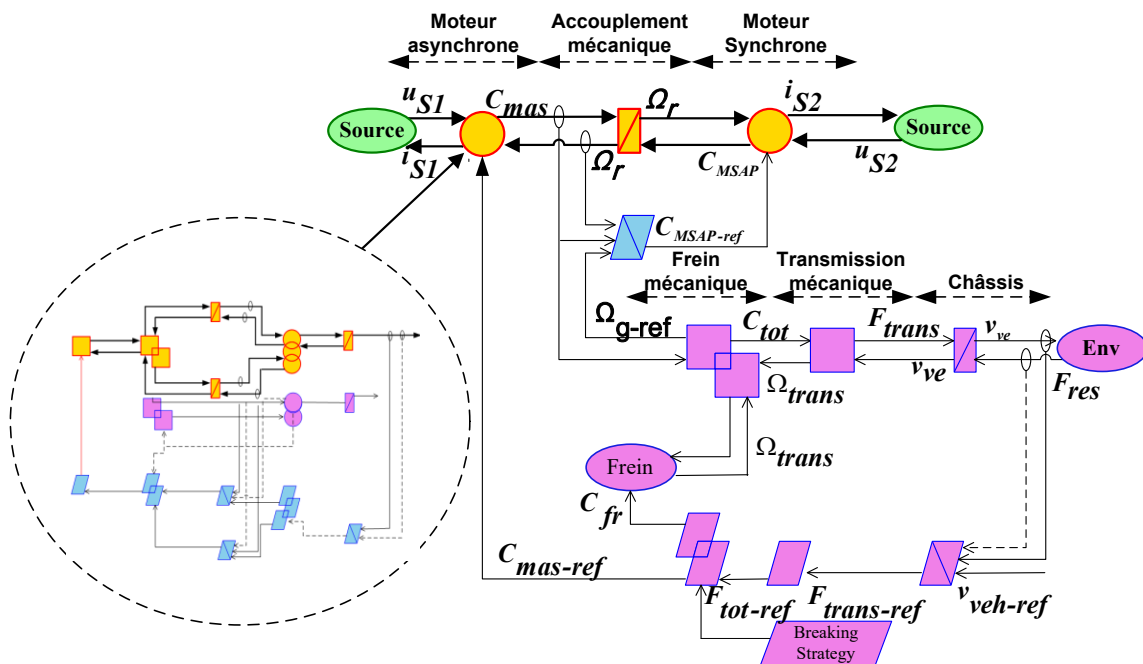


Figure 4-3 REM de la simulation HIL à pleine échelle

4.3 Simulation HIL de type mécanique à échelle réduite

4.3.1 Organisation de la « Simulation HIL » à échelle réduite

Pour effectuer une émulation à échelle réduite, il faut tout d'abord réaliser une simulation HIL de type puissance qui présente une simulation purement numérique. Cette étape permet de vérifier la réponse du système étudié en toute sécurité et éviter le risque du mal dimensionnement des équipements.

Pour réaliser cette simulation à échelle réduite, nous avons gardé la même organisation de la simulation à pleine échelle, mais en ajoutant un bloc d'adaptation de puissance comme le

présente la figure 4-4. Ce bloc convertit les valeurs à pleine échelle à des valeurs à échelle réduite en utilisant des coefficients de réduction.

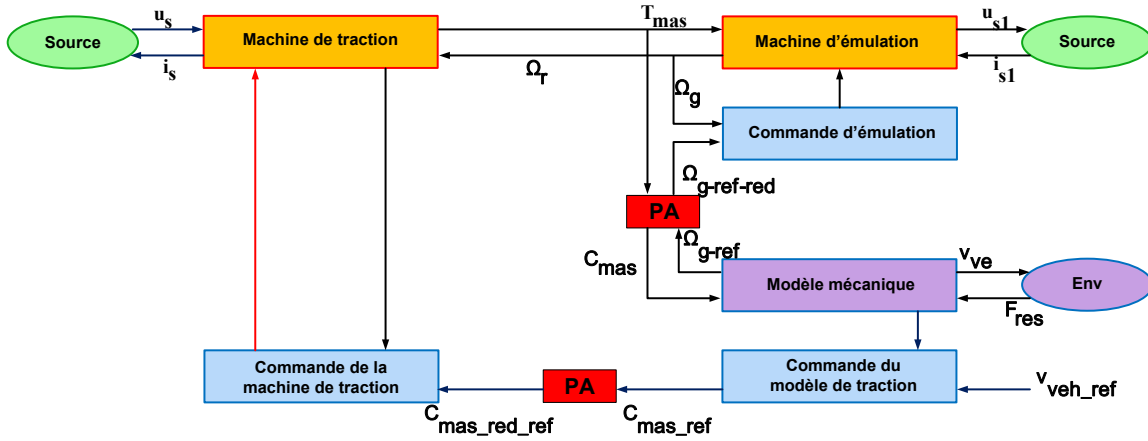


Figure 4-4 Organisation HIL à échelle réduite

Les relations présentées ci-dessous expliquent le fonctionnement de ce bloc vu qu'elles expliquent le passage de la pleine échelle à l'échelle réduite. Ω et C représentent respectivement la vitesse et le couple d'une machine quelconque

K_Ω et K_T sont les rapports de réduction.

$$\begin{cases} \Omega_{\text{pleine_échelle}} = k_\Omega \Omega_{\text{échelle_réduite}} \\ C_{\text{pleine_échelle}} = k_C C_{\text{échelle_réduite}} \end{cases} \quad (4.4)$$

Les coefficients de réduction sont définis par le rapport entre la valeur maximale à pleine échelle et la valeur maximale à l'échelle réduite du sous-système étudié.

Comme il a été déjà présenté précédemment, notre système se compose de deux machines d'émulation. Une machine asynchrone qui émule le système de traction et une machine synchrone à aimant permanent qui émule l'environnement du conducteur. Pour définir ces coefficients, une étude a été faite sur les limitations de ces deux machines. La figure 4-5 définit l'intervalle du travail qui respecte les limitations des machines d'émulation (la partie hachurée).

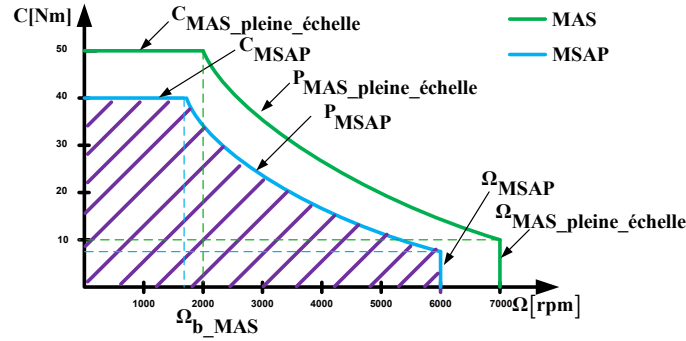


Figure 4-5: Limitations des machines d'émulation

La vitesse de rotation Ω_b (vitesse de rotation base) est obtenue lorsque la puissance et le couple maximaux sont obtenus (si la tension d'alimentation est égale à la valeur nominale, la vitesse base est égale à la vitesse nominale $\Omega_b = \Omega_{nominal}$).

Ainsi, pour bien définir les limitations couple/vitesse, il faut réaliser les cartographies de rendement de la machine électrique qui émule le sous-système de traction et de la machine à aimant permanent qui émule l'environnement de conducteur. Vu que la MSAP est commandée par un variateur de vitesse, il n'est pas nécessaire de définir une cartographie pour cette machine.

Cartographie de rendement de la MAS (Couple/vitesse de rotation) :

Le rendement de la motorisation dépend des points de fonctionnement. Une cartographie exprime généralement ce rendement en fonction du couple de la machine et de sa vitesse de rotation. La figure 4-6 présente le rendement de la machine d'émulation du système de traction.

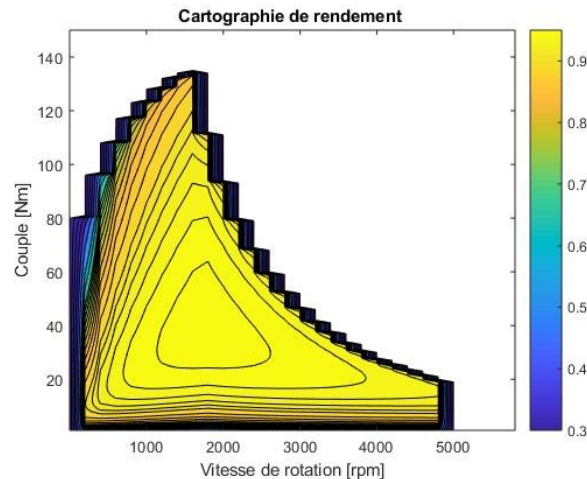


Figure 4-6: Cartographie de rendement de la MAS

Fonctionnement à échelle réduite:

La limitation de la puissance concerne seulement le système à pleine échelle. Pour élargir la plage de vitesse, le flux de la machine a été affaibli et le couple maximal a été diminué. Ces limitations sont définies pour le système à pleine échelle (ligne verte et ligne bleue figure 4-7). Le système à échelle réduite est présenté par la courbe rouge (figure 4-7). Cette échelle est définie par l'identification des coefficients de réduction.

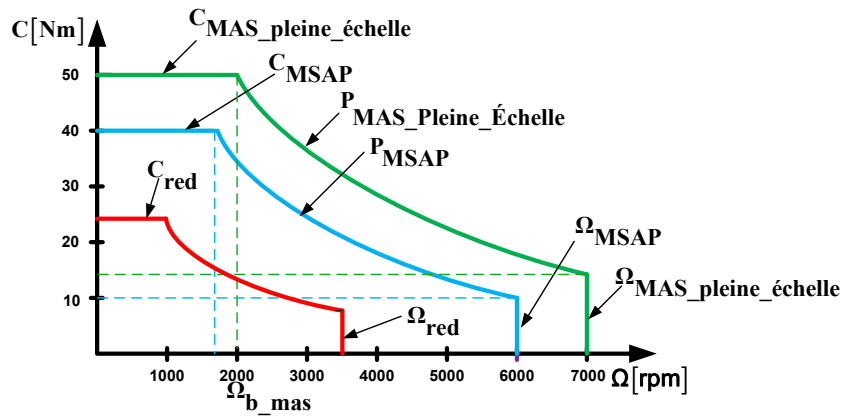


Figure 4-7 Limitations à pleine échelle et à échelle réduite.

Donc pour réaliser une simulation HIL à échelle réduite et comme nous l'avons expliqué précédemment, il faut définir des rapports de réduction. Dans le but d'avoir ces coefficients, nous avons réalisé deux organigrammes de réduction comme présenté sur la figure 4-8.

Le premier organigramme représente la méthode où nous avons réduit la puissance mécanique. Vu que la puissance mécanique est proportionnelle à la vitesse de rotation et le couple de la machine, nous avons réduit ces deux dernières variables dans le but de réduire la puissance.

Le deuxième organigramme dévoile la méthode avec laquelle nous avons réduit la puissance électrique. Cette méthode se base sur la variation de tension et du courant car la puissance électrique est proportionnelle à ces deux variables.

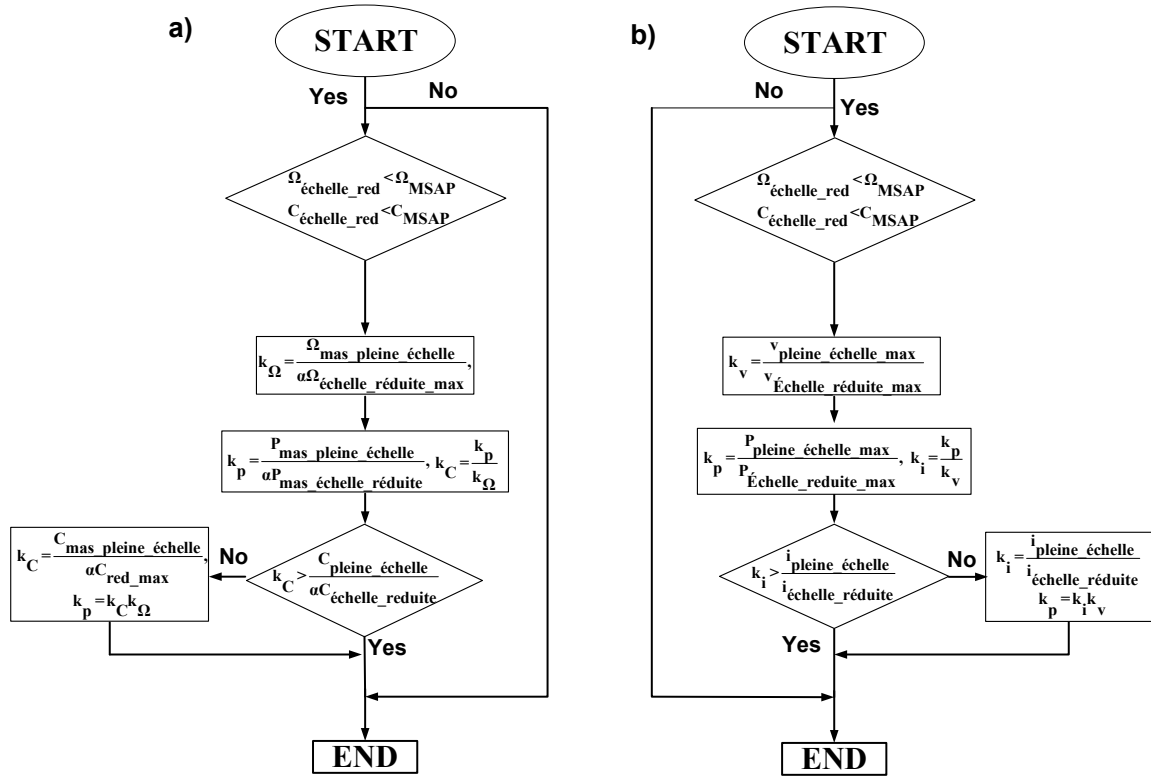


Figure 4-8 Organigrammes des rapports de réduction a) puissance mécanique b) puissance électrique

Où :

$\Omega_{\text{mas_échelle_réduite}}$	Vitesse de la machine d'émulation à échelle réduite
Ω_{MSAP}	Vitesse de rotation de la machine synchrone à aimant permanent
$\Omega_{\text{mas_pleine_échelle}}$	Vitesse de rotation de la machine asynchrone à pleine échelle
$P_{\text{mas_pleine_échelle}}$	Puissance de la machine à pleine échelle
$P_{\text{mas_échelle_réduite}}$	Puissance à échelle réduite
C_{MSAP}	Couple de MSAP
$C_{\text{mas_pleine_échelle}}$	Couple de la MAS à pleine échelle
$C_{\text{mas_échelle_réduite}}$	Couple à échelle réduite
k_p	Rapport de réduction de puissance
k_C	Rapport de réduction de couple
k_Ω	Rapport de réduction de la vitesse de rotation

k_i	Rapport de réduction du courant
k_v	Rapport de réduction de la tension
α	Marge de sécurité (5%)

4.3.2 REM et « Simulation HIL » à échelle réduite

Le passage d'une simulation à pleine échelle à une simulation à échelle réduite est effectué par l'implémentation d'un bloc d'adaptation de puissance et par la définition du rapport de réduction. Le bloc d'adaptation de puissance est représenté par un élément rectangulaire rouge barré. Ce rapport est défini suivant l'organigramme présenté précédemment et selon les limitations des machines d'émulation.

Pour cela, nous avons défini deux coefficients k_Ω (vitesse) et k_C (Couple) qui doivent être calculés en fonction des limitations mises en jeu par le sous-système étudié. La figure 4-9 présente l'implémentation des adaptateurs de puissance.

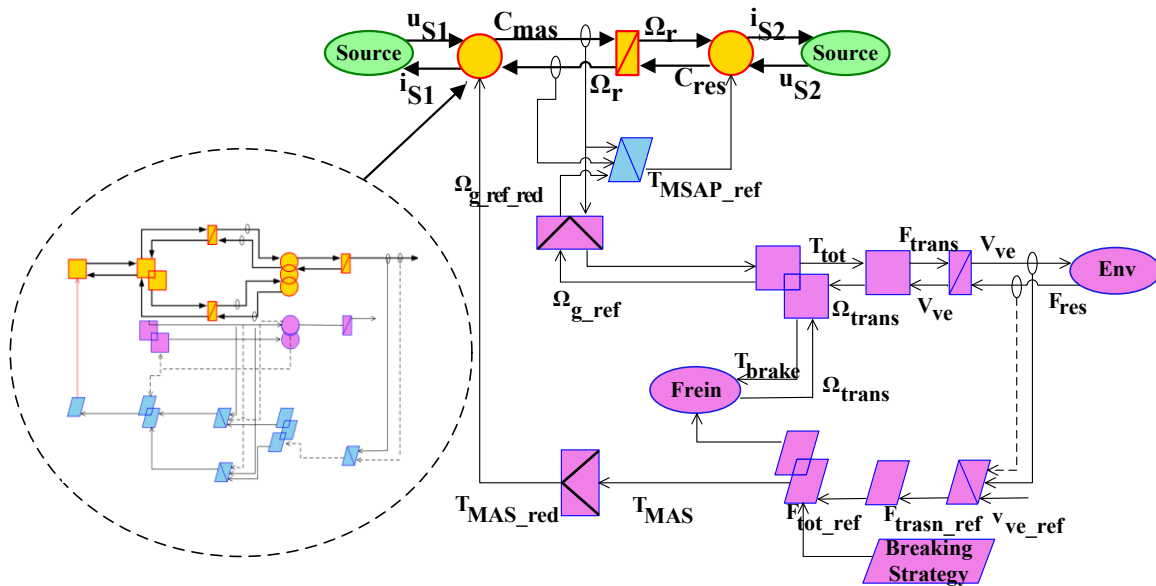


Figure 4-9 REM de simulation HIL à échelle réduite

Un environnement d'essai a été réalisé dans le but de valider notre système en simulation numérique avant de l'implanter sur une carte microcontrôleur en temps réel. La REM et la commande du système d'émulation effectuée précédemment sont directement implantées en simulation sous le logiciel Matlab/Simulink.

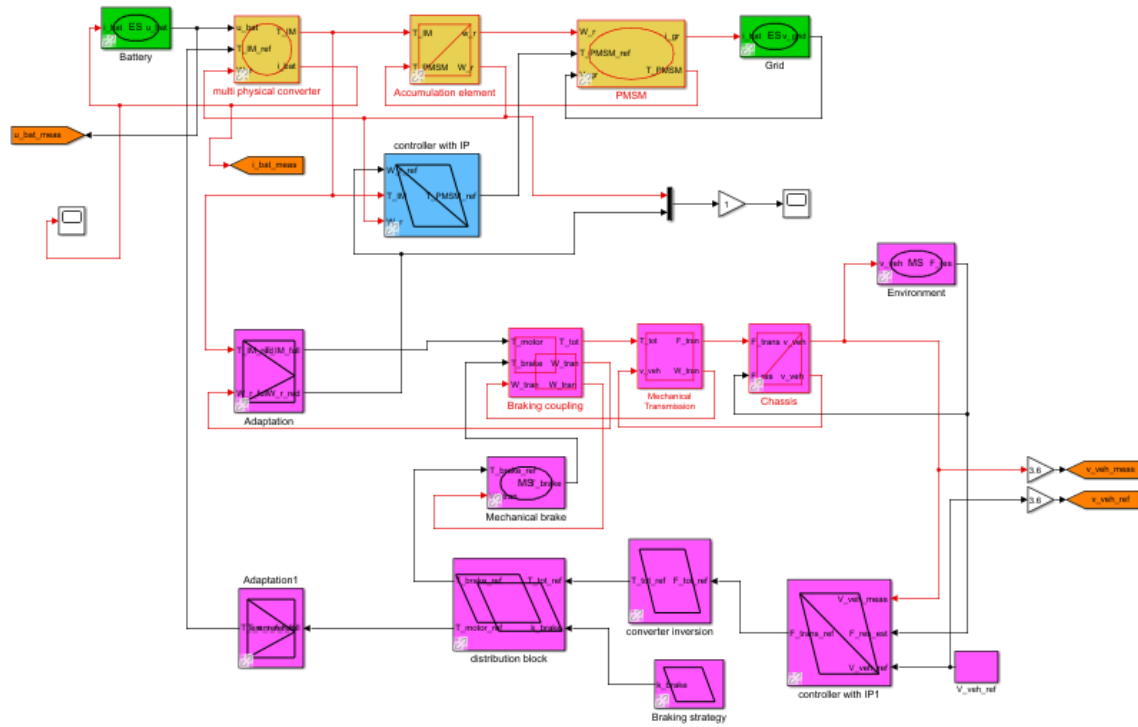


Figure 4-10 Simulation HIL à échelle réduite

Les résultats de la vitesse du véhicule, de la vitesse de rotation de la machine de traction, du couple et de la puissance mécanique sont présentés dans la fenêtre de simulation ci-dessous. La figure 4-11 montre qu'après le passage à la simulation à échelle réduite, notre système a gardé la bonne allure désirée en suivant parfaitement la référence donnée.

Conformément à la vitesse de rotation, nous avons appliqué une réduction sur le couple en utilisant l'organigramme et en prenant en compte la limitation du couple de la machine de l'émulation de la traction. D'après la figure 4.12a, nous constatons que notre système répond parfaitement aux consignes envoyées. Nous constatons aussi, que la MSAP tourne avec un couple plus petit que celui de la MAS, ce qui explique que la MSAP joue le rôle d'une charge mécanique appliquée sur l'arbre de la MAS.

Étant donné que la puissance mécanique est proportionnelle à la vitesse de rotation et au couple, la puissance a eu une réduction comme présentée dans la figure 4-12. La réduction est définie à l'aide de l'organigramme présenté dans la figure 4-8.

D'après cette simulation, nous constatons que la vitesse de rotation, le couple et la puissance respectent les limitations des machines d'émulation.

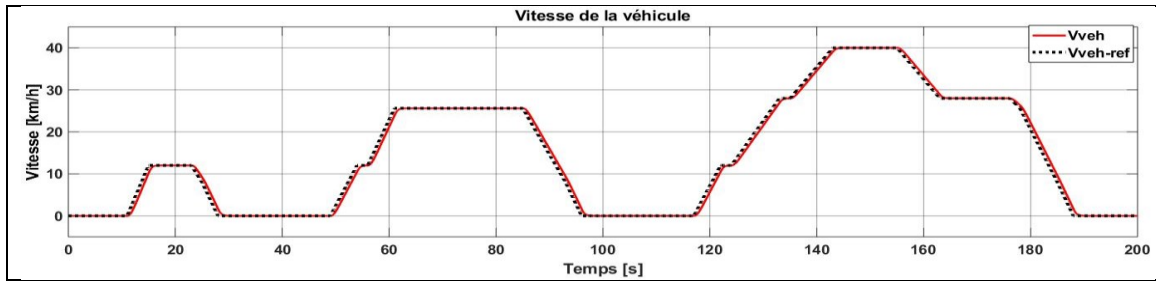


Figure 4-11 Vitesse du véhicule

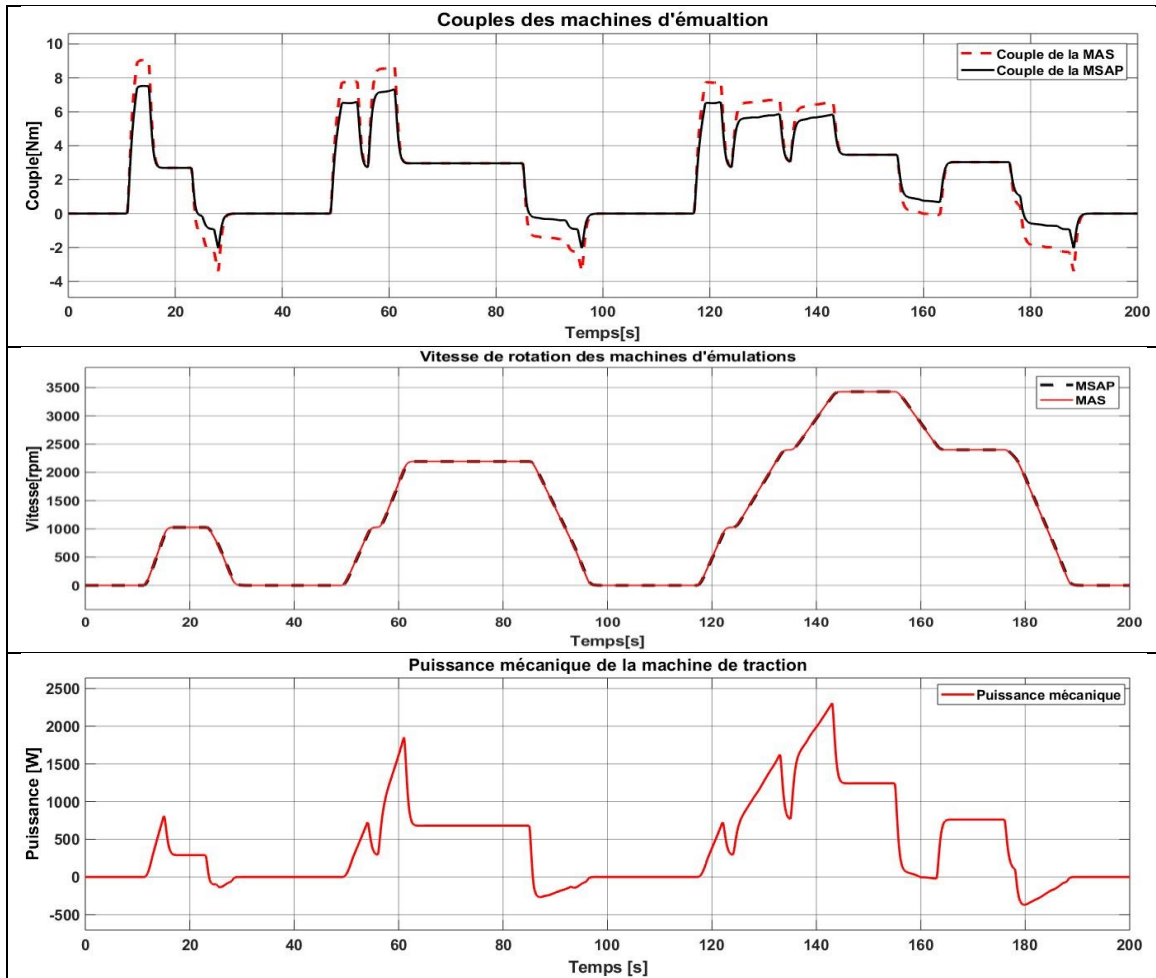


Figure 4-12 Couple, vitesse et puissance du banc d'essai

4.4 Conclusion

Dans le chapitre précédent (Chapitre3 Développement de la REM du véhicule eCommander), la simulation du eCommander et de la commande déduite par inversion de REM nous a permis de vérifier la réponse de la commande dans un cycle de conduite bien défini (NEDC).

La simulation HIL représente un outil de simulation avec lequel nous avons incorporé une partie physique du système étudié. Dans cette étude, notre véhicule a été simulé en échelle réduite par des machines électriques qu'imposent un comportement similaire au véhicule.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'organisation de la simulation HIL qui a été implémentée dans le logiciel Matlab/Simulink. Cette méthode nous a permis de vérifier le bon dimensionnement des équipements avant l'implémentation dans la carte microcontrôleur d'Opal-RT. Ce type de simulation a de multiples objectifs comme la validation directe des machines et l'utilisation des machines dans un environnement proche de celui du véhicule. Cette simulation reste une simulation logiciel vu que nous n'avons pas incorporé une partie physique. Pour cela, nous avons visé dans le chapitre suivant à réaliser une simulation en temps réel.

Chapitre 5 : Émulation temps réel d'un véhicule électrique

Le chapitre précédent nous a permis de réaliser un environnement de test dans le but de valider notre système avant de l'implanter sur une carte microcontrôleur. Ainsi, le but de ce chapitre est de réaliser une émulation à échelle réduite. L'objectif de cette émulation est de valider la commande développée dans le chapitre précédent en temps réel.

Pour réaliser une émulation à échelle réduite, un banc d'essai à échelle réduite doit être mis en œuvre dans le but d'incorporer des composants physiques.

Ce chapitre décrit la méthode de la validation de notre banc d'essai expérimental à échelle réduite qui est basé sur la configuration P-HIL de type mécanique qu'on a décrit précédemment.

Tout d'abord la structure de la plateforme sera présentée, ainsi que la façon de fonctionnement de ses composants. Pour réaliser une simulation HIL, le microcontrôleur doit être capable d'envoyer des commandes au microcontrôleur et recevoir des mesures de la part des machines. Les signaux analogiques sont utilisés pour envoyer les commandes et le protocole « CANopen » est utilisé pour envoyer les mesures. Le « CANopen » présente un protocole de communication qui fournit une grande normalisation et une interopérabilité entre les appareils.

Comme nous avons expliqué précédemment, notre machine synchrone à aimant permanent qui émule l'environnement est commandée par un variateur de vitesse industriel. Donc en deuxième lieu, nous avons effectué la commande de ce variateur en utilisant le logiciel *MOVITOOLS*. Nous avons réalisé également une commande pour le moteur de traction à l'aide de l'onduleur à six IGBT. Afin de s'assurer que nos machines fonctionnent de la manière désirable et que ces machines fournissent le rendement souhaité et correspondent aux références données, nous avons testé en troisième lieu les machines séparément. Enfin, nous avons accouplé nos machines mécaniquement dans le but d'effectuer notre émulation à échelle réduite.

5.1 Structure du banc d'essai :

Cette section présente la structure de la plateforme expérimentale que nous avons utilisée afin de valider la commande établie dans le sous-chapitre 3.2. Une émulation à échelle réduite de la traction du eCommander est proposée. Les modèles et les lois de commande pourront être validés avec la prise en compte des limitations et du comportement de chacun des composants du véhicule étudié.

La configuration de la plateforme a une très grande importance. Au cours de l'expérimentation plusieurs aspects ont été négligés lors de la simulation numérique. Ces aspects peuvent influencer sur la commande même si la topologie des équipements de la simulation HIL n'est pas identique à celle du système étudié. Cette étude nous permet de tester la robustesse de la commande avant l'implémentation.

Dans notre cas, la machine asynchrone du eCommander ne peut pas être séparée du véhicule étudié. Donc une plateforme à échelle réduite est proposée pour résoudre ce problème. Cette plateforme est composée d'une machine asynchrone à cage d'écureuil de 7.5 kW, couplée mécaniquement avec une machine synchrone à aimant permanent (MSAP).

La MAS qui émule le moteur de traction du eCommander est commandée par un onduleur Semiteach à six IGBT, alimenté par une tension de 460V du réseau. La MSAP qui émule l'environnement du véhicule, est commandée par un variateur de vitesse industriel SEW alimenté par une source de tension de 460V. Cette plateforme est composée aussi d'un bus de tension continue et d'une carte microcontrôleur DM6816 d'Opal-RT.

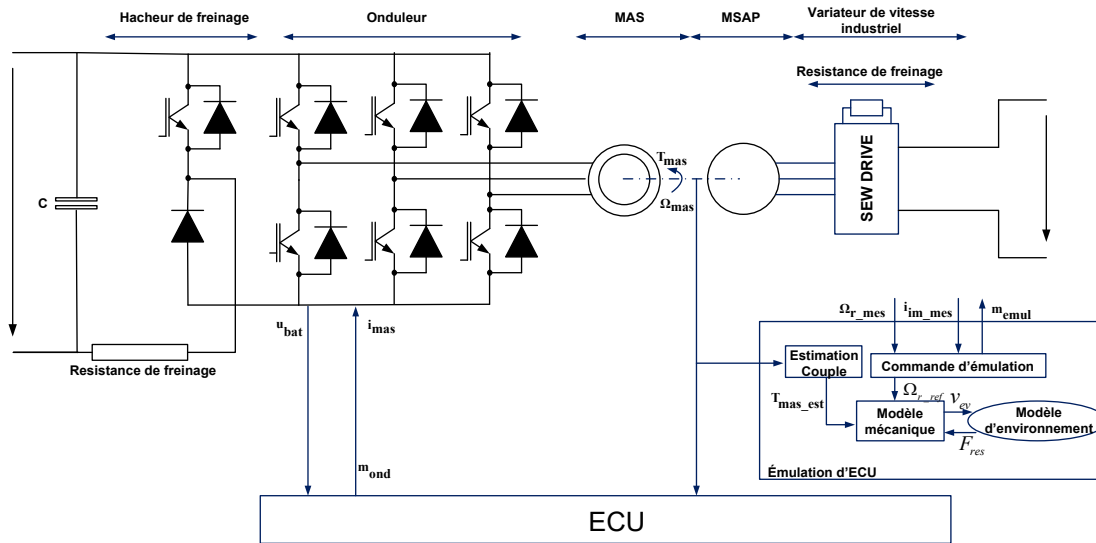


Figure 5-1 Configuration matérielle de la simulation P- HIL de type mécanique

Pour réaliser une communication entre les composants du banc d'essai et le microcontrôleur, nous avons appliqué une communication CAN (*Control Area Network*) pour résoudre cette problématique.

5.1.1 CANopen

Le Protocole CANopen est un protocole de communication qui est basé sur un système CAN. Les systèmes CAN sont caractérisés par plusieurs points forts qui permettent l'allocation du bus, la fiabilité des échanges de données, la détection des erreurs, etc. Le CANopen détermine le protocole de couche supérieure et la spécification de profil de périphérique.

Il utilise la philosophie « Maître/ Esclave » pour réaliser la gestion de bus où on trouve un Maître et un ou plusieurs Esclaves. Le Maître initialise, supervise et vérifie la communication entre les

esclaves. De cette façon, le protocole CANopen assure l'interopérabilité et la standardisation entre les équipements du système.

La partie la plus importante dans la CANopen est le dictionnaire des objets, car tous les paramètres des équipements, la configuration et les diagnostics de l'appareil se font en lisant et en écrivant ses valeurs dans ce dictionnaire. Le protocole comprend aussi le « SDO » (objet de données de service), le protocole « PDO » (objet de données de processus), le protocole « NMT » (gestion de réseau), des protocoles de fonction spéciale et des protocoles de contrôle d'erreur. Les principaux objets de communication sont le SDO et le PDO. Les SDO sont généralement utilisés pour la configuration des périphériques, tandis que les PDO sont utilisés pour l'échange d'informations en temps réel.

5.1.2 Test de la commande des machines d'émulation séparément

Avant de faire fonctionner les deux machines ensemble, ces machines doivent être testées séparément pour s'assurer qu'elles fonctionnent bien et produisent les résultats souhaités correspondant à la référence donnée. Premièrement, les machines ont été testées en utilisant des signaux digitaux. Ensuite elles ont été testées en utilisant un cycle de conduite comme référence pour déterminer leurs capacités d'appliquer le couple requis pour suivre la référence de vitesse donnée.

Selon la REM de la simulation HIL (figure 4-9), la commande du couple est requise pour la machine de traction et la commande de vitesse est requise pour la machine de charge. Cependant, la commande de la vitesse de la machine de charge est effectuée via la mise en œuvre de Matlab/Simulink. La machine de charge recevra également un couple de référence.

Par conséquent, les deux machines doivent fonctionner en mode couple. La machine de charge est déjà utilisée en mode couple. De ce fait, aucune configuration supplémentaire n'était nécessaire. Cependant, la machine de traction est initialement configurée en mode vitesse. C'est pourquoi certains paramètres supplémentaires ont dû être configurés pour pouvoir fonctionner en mode couple.

5.2 Mise en œuvre de P-HIL à échelle réduite

Pour la mise en œuvre de notre échelle réduite, la simulation a été réalisée sur Matlab/Simulink, la figure ci-dessous présente une telle simulation. Le programme que nous avons réalisé précédemment est présenté sur les figures 5-3 et 5-4. La figure 4-10 est adaptée pour donner les références et prendre les mesures du système réel au lieu de l'estimer des modèles numériques. Comme le montre la figure 5-3 notre système est présenté sous forme des blocs qui sont proportionnels entre eux.

Le modèle Matlab/Simulink d'OPAL-RT nécessite deux sous-systèmes pour la simulation et commande en temps réel. Lors de l'exécution du modèle en temps réel, le sous-système « Maître » contient la partie de calcul qui n'a besoin d'aucune modification, car il est exécuté sur le simulateur. Les E/S des blocs sont également conservées dans le sous-système de calcul, tandis

que les points de consigne et les variables à modifier lors de la commande en temps réel sont contenus dans le sous-système « Console ».

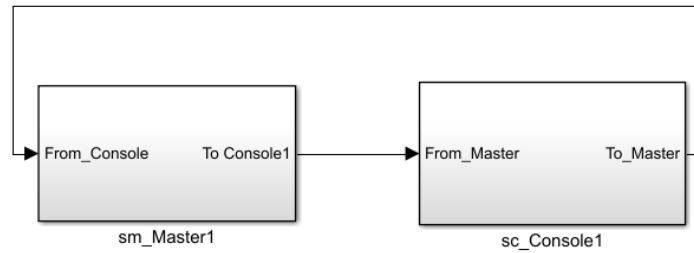


Figure 5-2 Modèle Matlab/Simulink d'Opal-RT

À l'intérieur du bloc « Master » nous trouvons les blocs des commandes et d'estimations pour les machines d'émulations (machine de traction et machine de charge) figure 5-3.

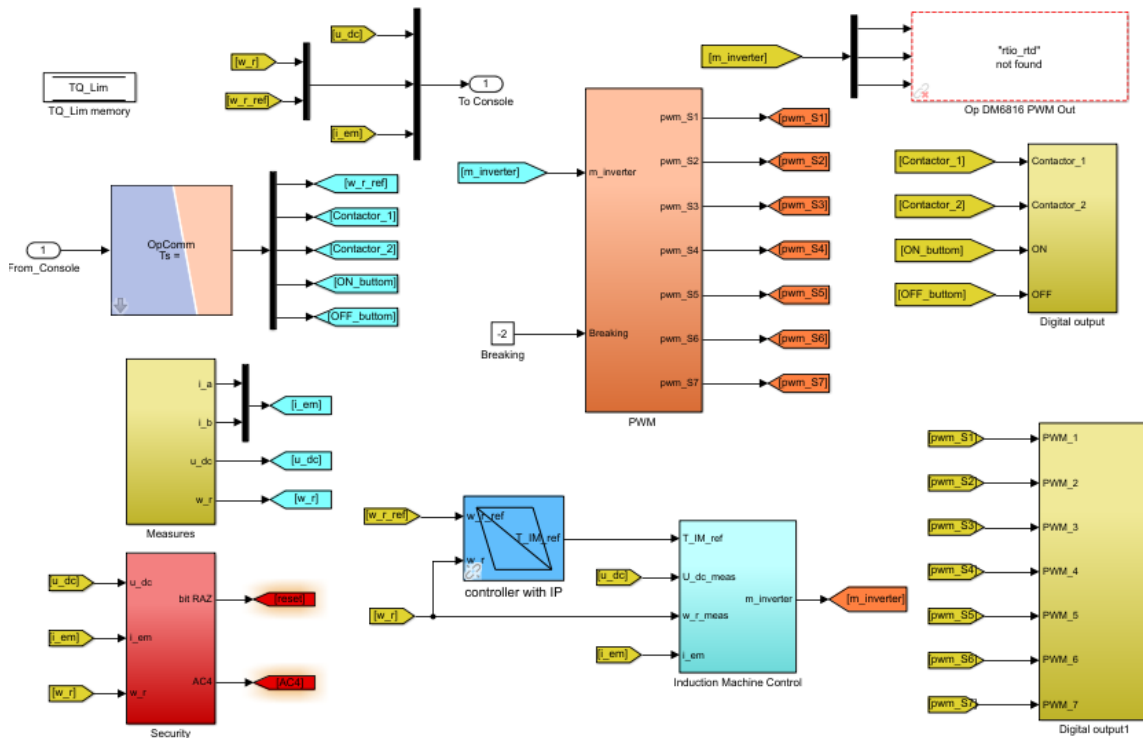


Figure 5-3 « Bloc maître » d'Opal-RT

La figure 5-3 dévoile la façon d'implantation de la simulation HIL de type puissance dans la carte microcontrôleur d'Opal-Rt. Dans le microcontrôleur nous avons implémenter seulement la partie de commande du notre système étudié vue que la partie puissance a été remplacé par nos machines électriques d'émulation.

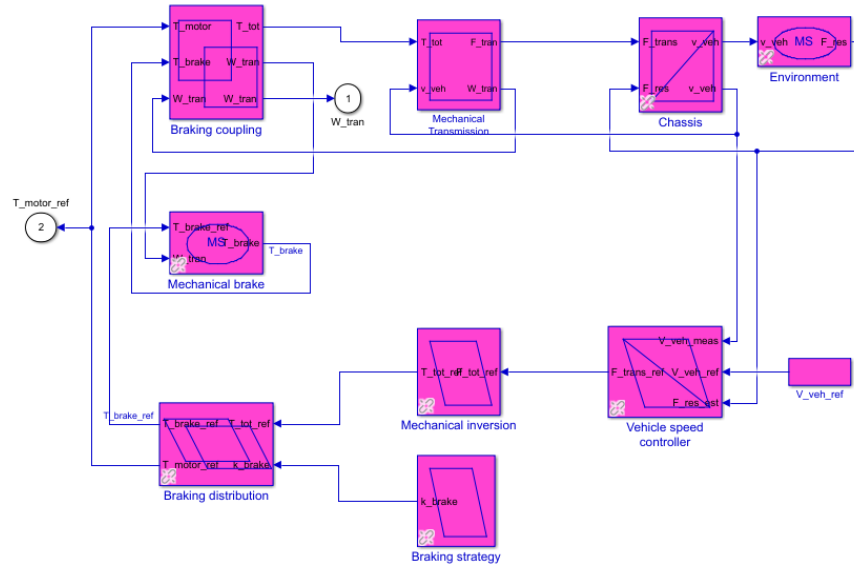


Figure 5-4 Bloc de la machine de charge qui émule l'environnement de conducteur

La simulation sera réalisée en utilisant un cycle de conduite bien défini (NEDC). Plusieurs réglages sont nécessaires pour obtenir les meilleurs résultats. Ceux-ci incluent le réglage de la commande de vitesse (Correcteur PI et IP) et du bloc de compensation. Les correcteurs ont été initialement réglés en utilisant la méthode de placement des pôles comme il est expliqué dans l'annexe A.

5.3 « Émulation P-HIL » des systèmes étudiés :

Pour vérifier que notre banc d'essai répond à nos besoins, nous avons effectué des essais sur deux différents véhicules (le eCommander et le SMART de l'ATEUS) suivant divers cycles de conduite.

Les spécifications de la SMART, la modélisation et la représentation de la REM sont présentées dans l'Annexe B. La représentation de la REM est réalisée dans le but de faciliter l'implémentation dans le banc d'essai.

Les cycles de conduite utilisés sont :

- NEDC : nouveau cycle européen de conduite.
- WLTC class 2 : Cycles d'essai harmonisés dans le monde entier pour véhicules légers.
- ARTEMIS : évaluation et fiabilité des modèles d'émissions de transport et des systèmes d'inventaire (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems).

5.3.1 Validation du eCommander :

5.3.1.1 Résultat de P-HIL suivant le Cycle NEDC

Pour réaliser notre simulation, nous avons utilisé le cycle de conduite NEDC comme référence. Les résultats de cette simulation sont présentés sur les figures ci-dessous.

La vitesse du véhicule émulé suit parfaitement la référence donnée (figure 5-5). Les dépassements qui apparaissent sur la figure 5-5 sont dus à des bruits au niveau des capteurs (conditions des essais expérimentaux). Suivant le résultat obtenu concernant les couples générés par les machines d'émulation, nous constatons que les couples respectent les limitations et suivent les références données. En observant aussi le résultat concernant la simulation du couple, nous constatons un petit dépassement qui peut-être expliqué par la pointe du couple lors de changement de valeur de vitesse du couple par exemple lors du démarrage de zéro ou lors de la réduction du couple d'accélération au couple de vitesse constante. De sa part, les vitesses de rotation des machines d'émulation suivent parfaitement la référence donnée.

Donc suivant les résultats obtenus, nous pouvons conclure que notre plateforme à échelle donne les résultats désirés.

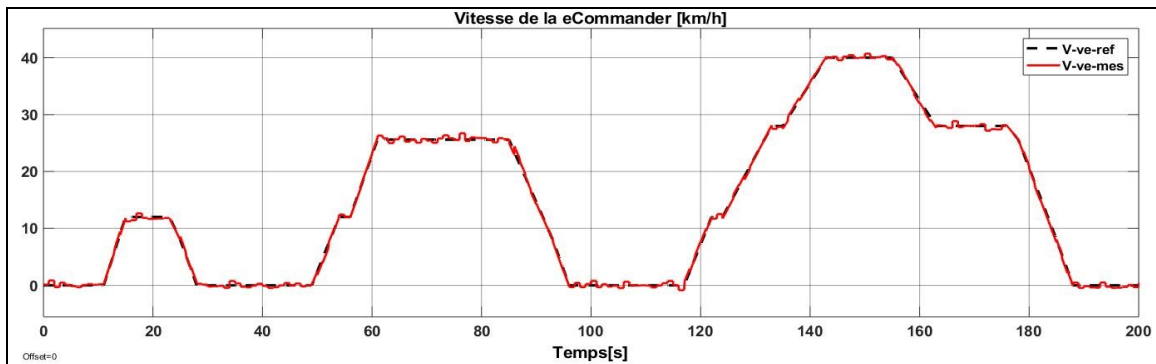


Figure 5-5 Vitesse du véhicule

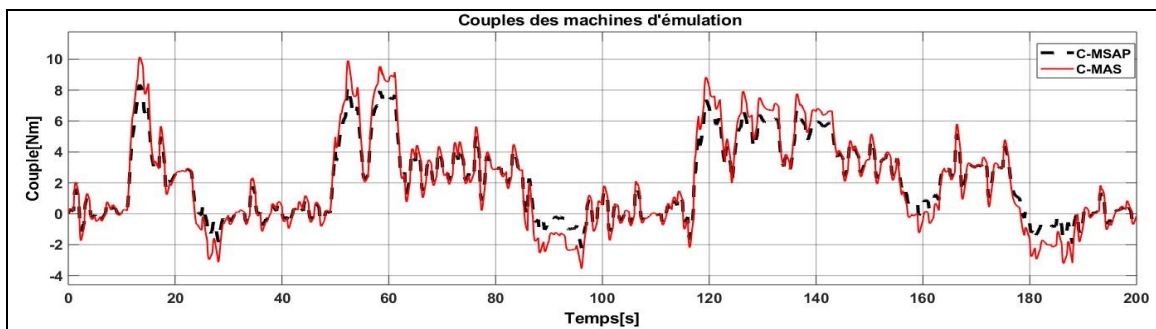


Figure 5-6 Couples des machines d'émulation

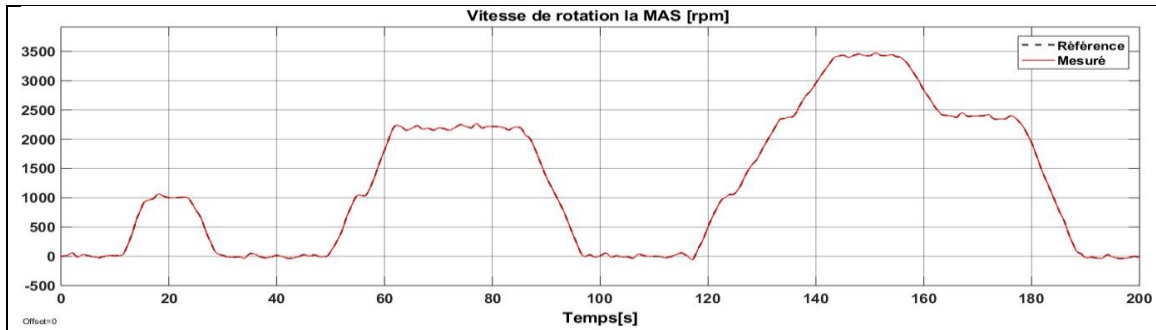


Figure 5-7 Vitesse de rotation de la MAS

5.3.1.2 Résultat de P-HIL à échelle réduite suivant le Cycle WLTC de deuxième classe :

Après l'émulation HIL du eCommander et la validation des résultats obtenus, nous avons changé le cycle de conduite « NEDC » au cycle « WLTC » de deuxième classe.

Vu que les coefficients de réduction dépendent du cycle de conduite, nous avons implémenté des nouveaux rapports pour que nous puissions effectuer des essais sur notre banc d'essai.

Les résultats de cette simulation sont présentés sur les figures ci-dessous. Comme présenté sur la Figure 5-8, la vitesse du système étudié suit parfaitement la référence donnée en exceptant quelques petits dépassements et ondulations. La vitesse de rotation de la machine suit également très bien la référence. Les figures 5-9 et 5-10 présentent respectivement les couples des machines d'émulation après avoir appliqué la réduction où ces couples respectent parfaitement les limitations. De même, la vitesse de rotation suit parfaitement la référence donnée comme présentée sur la figure 5-11.

Étant donné que la puissance mécanique dépend de la vitesse de rotation de la machine et du couple, cette puissance a été réduite suivant les coefficients de réduction définis par l'organigramme.

Les dépassements et les petites ondulations qui apparaissent lors de la simulation sont à cause des bruits au niveau des capteurs (conditions des essais expérimentaux).

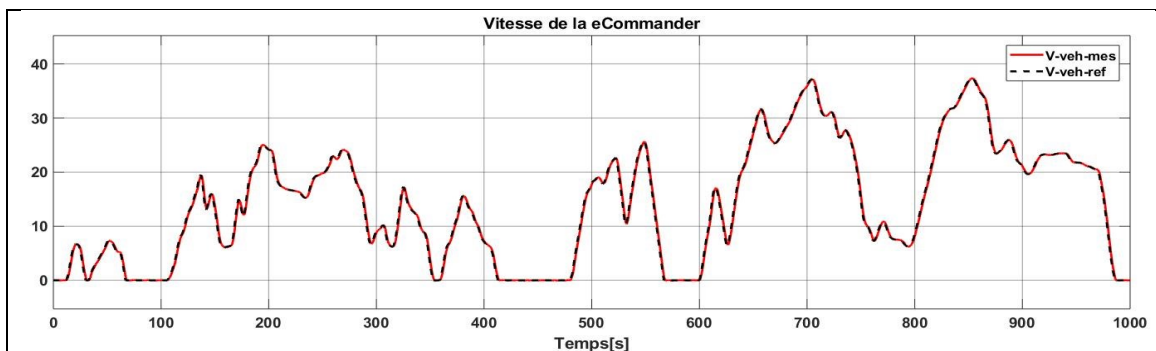


Figure 5-8 Vitesse eCommander suivant le cycle « WLTC »

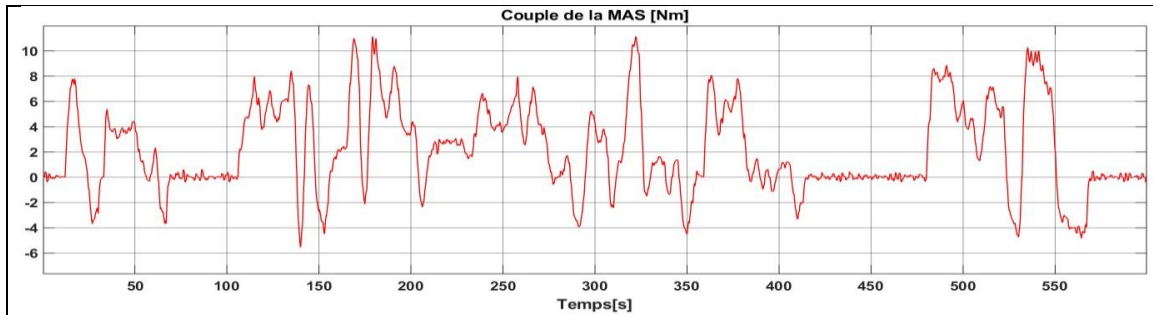


Figure 5-9 Couple de la MAS

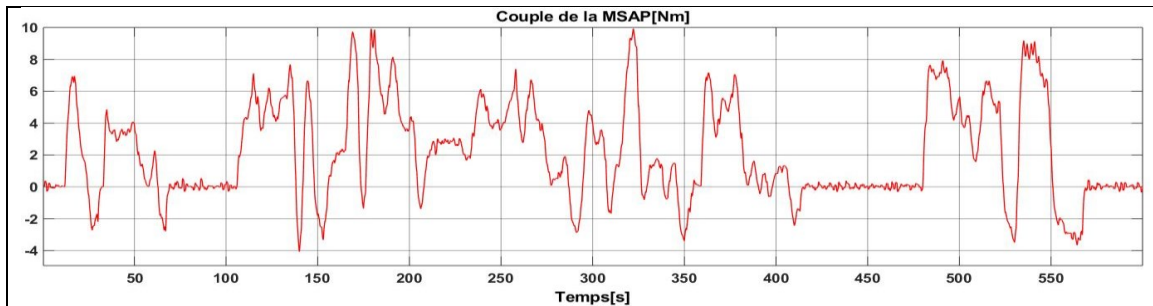


Figure 5-10 Couple de la MSAP

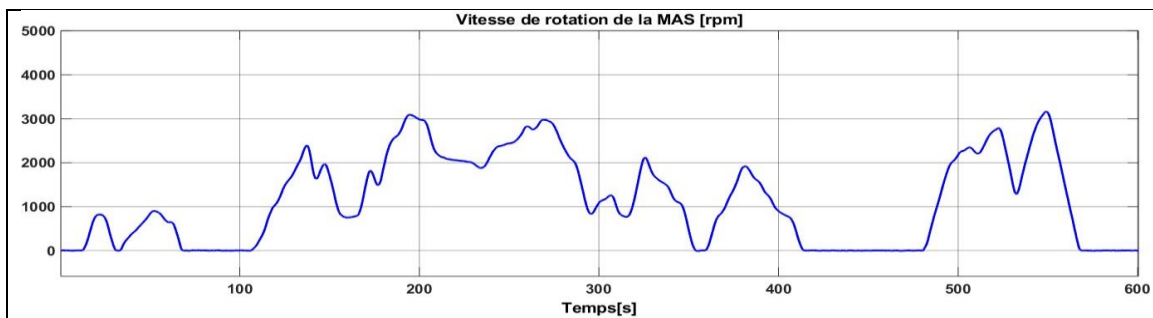


Figure 5-11 Vitesse de rotation de la machine asynchrone

Après la validation du eCommander suivant deux cycles de conduite différents, nous pouvons assurer que notre banc d'essai et notre algorithme répondent à nos besoins.

Pour assurer que notre banc d'essai à échelle réduite est compatible avec diverses topologies, nous avons implémenté un nouveau véhicule (la SMART d'ATEUS).

La topologie et les caractéristiques de la SMART sont présentées dans l'annexe.

5.3.2 Validation de la SMART d'ATEUS :

De la même manière que le véhicule eCommander, nous avons effectué nos essais sur la SMART sur deux cycles de conduite (NEDC et WLTC).

Vu que la SMART possède une topologie différente de celle du eCommander avec différents paramètres, nous avons défini de nouveaux coefficients de réduction en appliquant le même algorithme présenté précédemment.

5.3.2.1 Résultat de P-HIL suivant le Cycle NEDC

Après la définition des coefficients de réduction pour le couple et la vitesse de rotation pour la machine d'émulation, nous avons effectué nos essais suivant le cycle NEDC.

Avant de réaliser une simulation HIL, une simulation logicielle a été réalisée dans le but de vérifier le bon choix des coefficients de réduction en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Après la validation de la topologie et de la simulation, nous avons implémenté notre système étudié sur le banc d'essai afin d'effectuer une simulation HIL.

Les résultats obtenus après la simulation sont présentés dans les figures 5-12, 5-13, 5-14 et 5-15.

Pour la vitesse de la SMART, nous constatons que cette dernière suit parfaitement la référence donnée avec des petits dépassements causés par le bruit sur les capteurs lors de la mesure. Ce dépassement est considéré comme négligeable vu qu'il n'a aucun effet sur la réponse de notre système étudié (figure 5-12).

Conformément à la vitesse du véhicule, la vitesse de rotation de la machine de traction suit parfaitement la référence donnée figure 5-15.

Les figures 5-13 et 514 présentent les couples des deux machines d'émulation (MAS et MSAP). D'après les résultats obtenus, nous constatons que le couple de la MSAP est toujours inférieur au couple de la MAS, ce qui explique le rôle de cette machine qui émule l'environnement de notre véhicule. D'après les résultats des simulations, nous constatons que ces couples respectent les limitations des machines.

Comme la puissance mécanique est proportionnelle au couple et à la vitesse de rotation de la machine, et vu que ces deux paramètres ont été réduits en utilisant l'algorithme de réduction, cette puissance a été réduite suivant les coefficients de réduction.

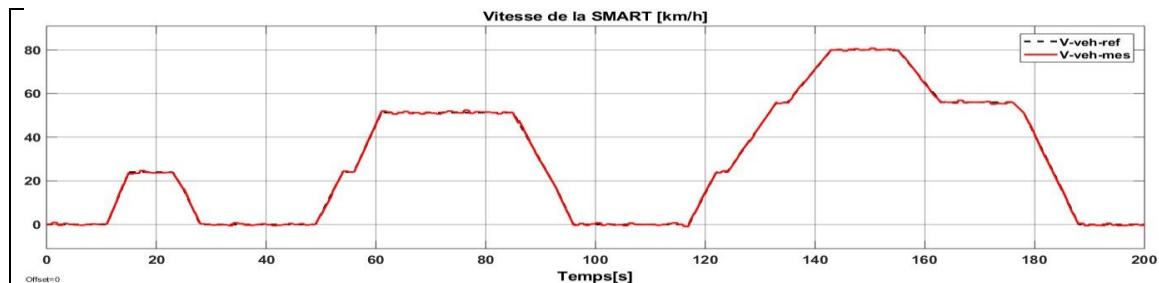


Figure 5-12 Vitesse de la SMART

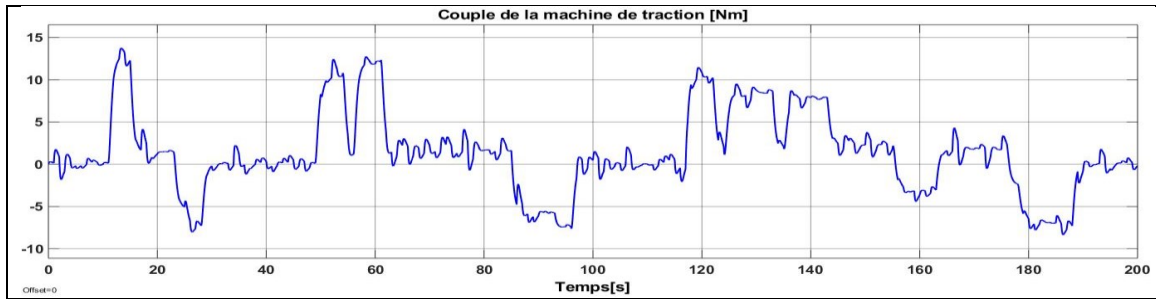


Figure 5-13 Couple de la machine de traction

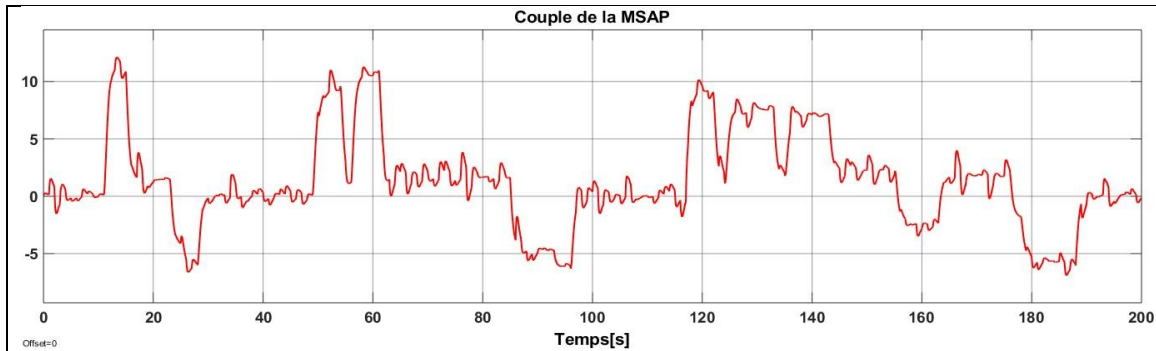


Figure 5-14 Couple de la MSAP

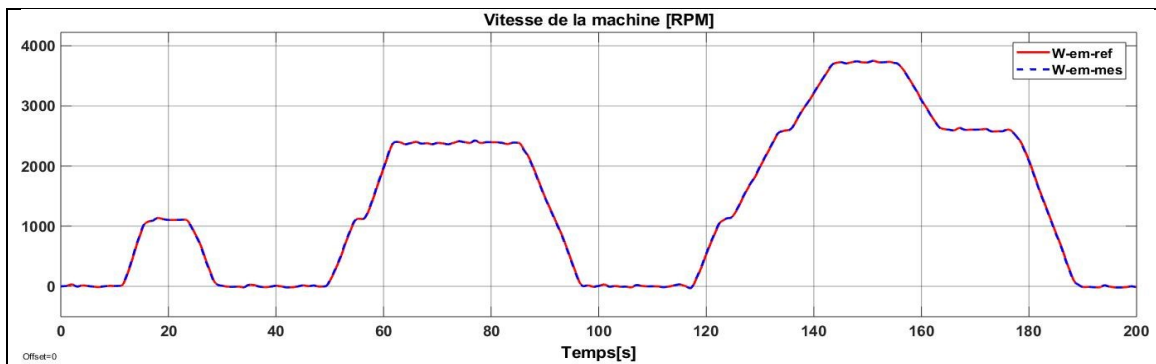


Figure 5-15 Vitesse de rotation de la machine

5.3.2.2 Résultat de P-HIL suivant le Cycle WLTC

Les figures ci-dessous présentent les résultats obtenus selon le cycle WLTC. Conformément aux cycles étudiés précédemment, notre banc d'essai nous a fourni les réponses désirées.

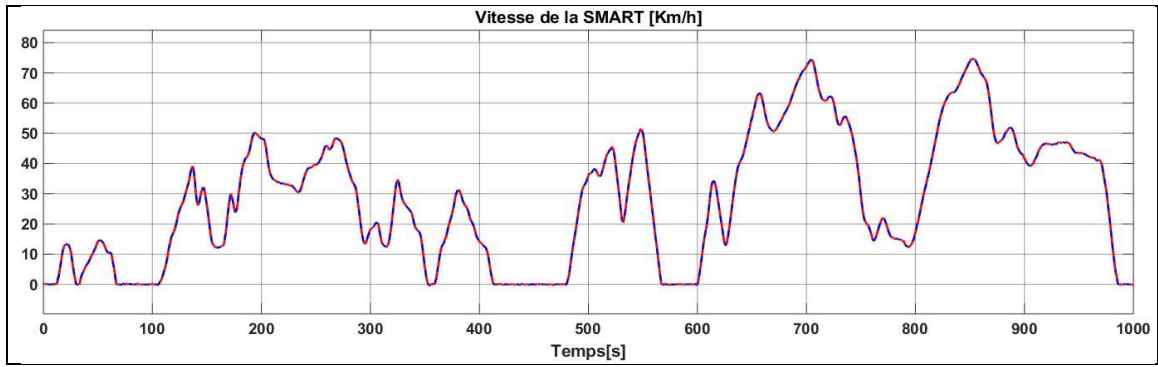


Figure 5-16 Vitesse de la SMART

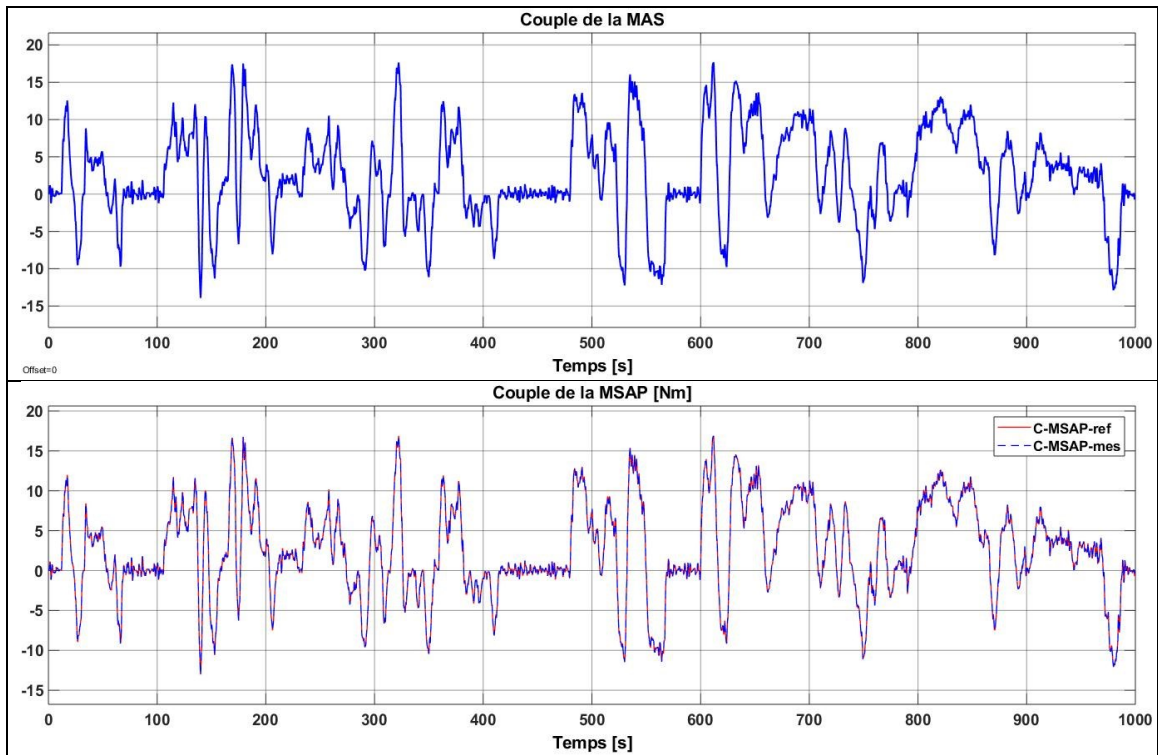


Figure 5-17 Couple machine d'émulation a)MAS b)MSAP

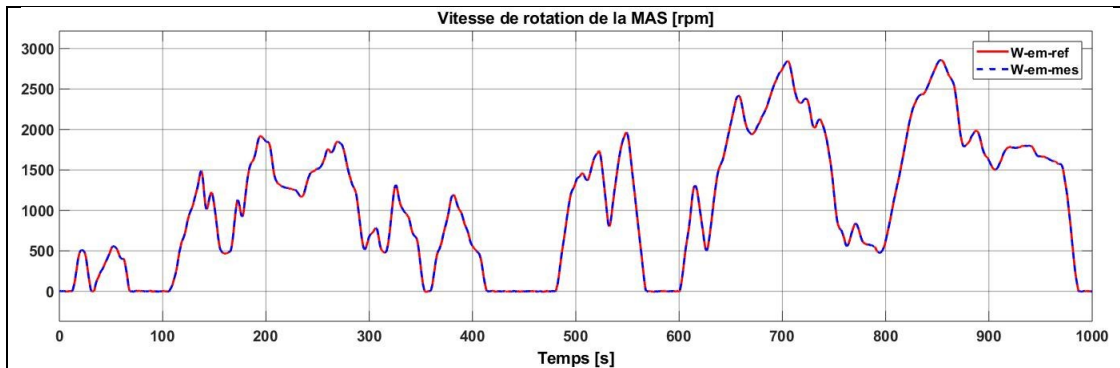


Figure 5-18 Vitesse de rotation de la MAS

5.4 Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, un banc d'essai pour les véhicules électriques basé sur le simulateur numérique en temps réel en puissance a été mis en œuvre. L'objectif principal de ce chapitre était de valider le comportement des véhicules électriques et les différentes stratégies de gestion d'énergie dans des conditions réelles. Donc pour implémenter une simulation HIL de type puissance, nous avons tout d'abord réalisé une simulation à pleine échelle afin de vérifier si notre système donne les performances désirées. Deuxièmement, nous avons ajouté un bloc d'adaptation de puissance dans le but de passer d'une simulation à pleine échelle à une simulation à échelle réduite. Pour réaliser ce passage, nous avons défini des coefficients de réduction en utilisant l'organigramme défini précédemment. Après que la validation des résultats de simulation à échelle réduite a été faite, nous avons mis en œuvre notre banc d'essai à échelle réduite où nous avons décrit sa structure. Ensuite, nous avons réalisé une communication entre les équipements en utilisant le protocole CANopen. Par la suite, nous avons testé nos deux machines séparément dans le but de vérifier si elles suivent parfaitement les consignes données. Puis, nous avons accouplé mécaniquement nos deux machines d'émulation. Enfin et en utilisant le logiciel RT-Lab, nous avons implémenté le programme de commande dans le microcontrôleur d'Opal-RT.

Conclusion générale

6.1 Conclusion

Dans le cadre de ce projet, nous avons réalisé un banc d'essai à échelle réduite pour les véhicules électriques et leurs composants afin de valider des essais sur ces composants dans des conditions réelles. Cette maîtrise présente un processus de développement d'une simulation *Hardware-In-The-Loop* d'un véhicule électrique.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une modélisation dynamique du système étudié qui nous a permis de représenter notre système étudié. Après que la modélisation a été faite, la REM de notre véhicule électrique a été développée sous le logiciel Matlab/Simulink. En second lieu, nous avons réalisé une simulation à pleine échelle dans laquelle nous avons remplacé l'environnement du conducteur par une machine synchrone à aimant permanent. Pour le système de traction, nous avons remplacé le moteur de traction par une machine asynchrone triphasée. Après la réalisation d'une simulation à pleine échelle, nous avons vérifié la compatibilité de nos équipements et la réponse de nos machines d'émulation avant l'implémentation du coefficient de réduction. Ces coefficients de réduction permettent d'effectuer le passage d'une simulation à pleine échelle à une simulation HIL à échelle réduite sous le logiciel Matlab/Simulink.

Pour réaliser une émulation à échelle réduite, nous avons commencé par tester nos deux machines d'émulation séparément dans le but de vérifier que ces deux machines suivent parfaitement les consignes données avant de les accoupler mécaniquement. Pour commander ces deux machines, nous avons utilisé un variateur de vitesse industriel pour la MSAP et un onduleur commandé par un signal PWM pour la MAS. La communication a été réalisée en utilisant le CANopen.

Finalement, nous avons implémenté la simulation HIL via la plateforme d'Opal-RT où nous avons réalisé des essais sur deux différentes topologies des véhicules électriques dans le but de vérifier que notre banc d'essai est compatible avec des différentes topologies.

6.2 Discussion et travail futur:

Bien que le banc de test puisse maintenant effectuer une simulation de type HIL, l'optimisation du programme peut être effectuée pour obtenir une meilleure réponse de la machine.

En ce qui concerne l'implémentation du véhicule étudié, le prochain défi est de comparer les résultats obtenus avec notre banc de test à ceux obtenus par notre système réel. Il serait également utile d'obtenir plus d'informations sur notre véhicule afin d'avoir plus de précision. Une fois que la simulation HIL à échelle réduite est validée, une simulation HIL à pleine échelle serait effectuée. Notre banc de test peut être adapté pour étudier des différents systèmes comme les machines électriques, les différentes stratégies de gestion d'énergie, électronique de puissance, etc.

En conclusion, ce banc d'essai à échelle réduite qui a été réalisé au sein de « *e-TESC lab* » de l'Université de Sherbrooke pourrait être un outil très puissant et flexible basé sur la simulation P-HIL. Pour cette raison, cette méthode peut être considérée comme une étape intermédiaire avant le passage à l'implémentation dans un système réel.

Annexe A : Commande par Inversion de la REM

Une commande par inversion est une commande qui est réalisée par l'inversion de la fonctionnalité d'un système. Il existe de différentes étapes qui sont requises pour identifier la structure de la commande.

Après la définition de la REM, les objectifs de la commande sont déduits. Une chaîne de réglage qui génère la communication entre les entrées de réglage et les sorties de commande est défini.

L'inversion de la REM est réalisée selon la chaîne de commande en utilisant la méthode effet miroir et suivant les règles présentées dans le deuxième chapitre. Seulement les éléments d'accumulation qui doivent être inversés en boucle fermé. L'inversion en boucle fermé demande toujours l'implantation des correcteurs et des capteurs.

La REM ne définit pas la nature de ces correcteurs utilisés de la SMC. Les correcteurs sont déterminés selon les performances désirées. Généralement pour la commande vectorielle, nous nous intéressons aux correcteurs PI vu qu'ils assurent la stabilité des systèmes de traction.

Comparaison entre correcteur PI et correcteur IP :

Cette section présente les performances des deux correcteurs usuels, PI et IP, utilisés dans la commande vectorielle, du premier et de second ordre.

Les systèmes à étudier doivent être toujours définis par une fonction de transfert $T(s)$. Cette fonction permet de présenter les schémas fonctionnels. Ces schémas sont présentés dans les figures ci-dessous (figures A-1 et A-2).

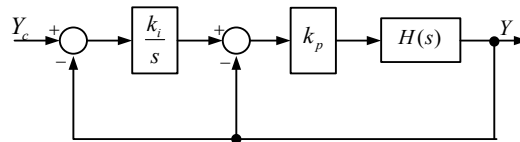


Figure A-1 Structure avec un correcteur PI

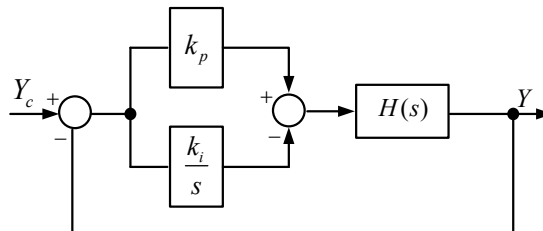


Figure A-2 Structures avec correcteur IP

avec

$$T(s) = \frac{1 + sT_n}{sT_i}$$

On peut également écrire $T(s)$ de la manière suivante :

$$T(s) = \frac{1 + sT_n}{sT_i} = \frac{T_n}{T_i} + \frac{1}{sT_i} = k_p + \frac{k_i}{s} \text{ avec } k_p = \frac{T_n}{T_i} \text{ et } k_i = \frac{1}{T_i}$$

Synthèse des correcteurs :

En appliquant les relations citées précédemment et la structure du correcteur IP, nous pouvons avoir une possibilité de réaliser la synthèse d'un correcteur PI. À travers de cela, nous pouvons déduire les paramètres du correcteur IP. Cette méthode nous permettra d'avoir des valeurs trop élevées de K_p et K_i .

1. Comparaison entre le correcteur PI et le correcteur IP :

La comparaison entre les deux correcteurs est réalisée en se basant sur la performance donnée par chacun de ces deux correcteurs. La performance du correcteur est définie par le comportement de poursuite et de régulation (figure A-3).

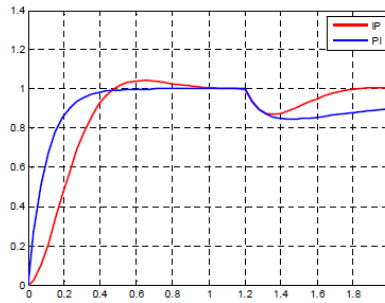


Figure A-3 Tests de poursuite des deux régulateurs PI et IP [35]

2. Correcteur de la commande par inversion de la REM :

Comme présenté ci-dessous, notre système contient quatre blocs qui accumulent de l'énergie (Armatures d-q, flux et châssis). Pour les commander, nous aurions besoin de réaliser une commande par inversion indirecte (boucle fermée) en utilisant des fonctions de transfert et des correcteurs selon les performances désirées.

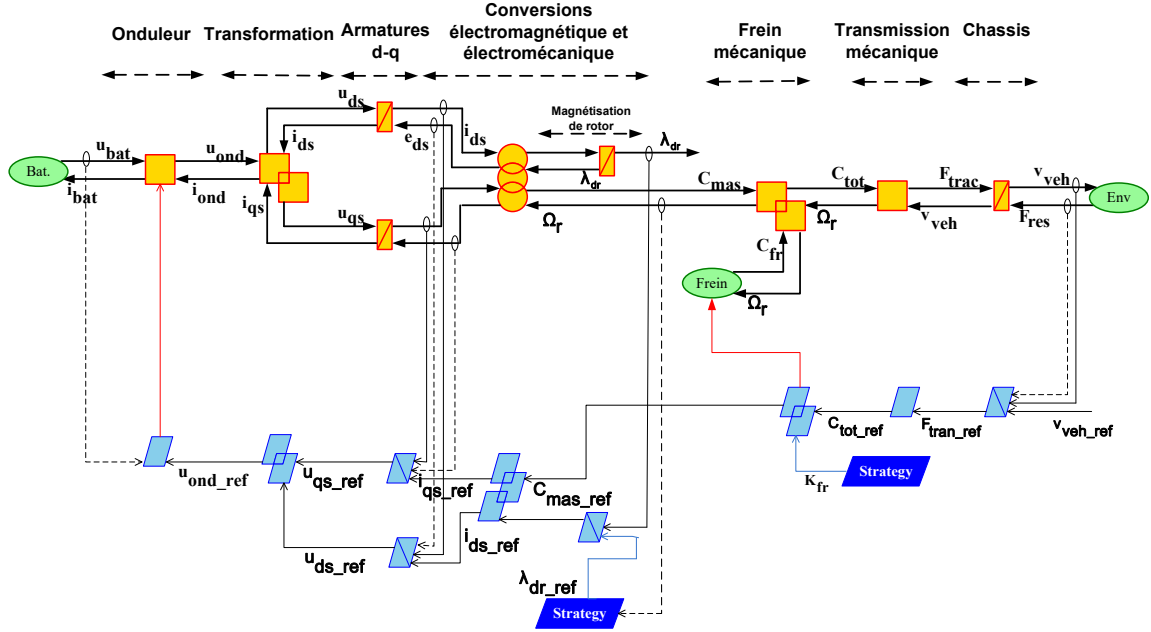


Figure A-4 Système étudié

Admettons $H_{Chass}(s)$ la boucle fermée qui concerne le châssis et $C_{Chass}(s)$ son correcteur[36] [36][37]. De ce fait, le sous-système énergétique est défini dans le domaine de Laplace de la manière suivante : [36][37]

$$T_1(s) = \frac{v_{ve}}{v_{ve-ref}} = \frac{H_1(s)C_1(s)}{1 + H_1(s)C_1(s)} = \frac{k_1 k_{p1} s + k_1 k_{i1}}{s^2 + k_1 k_{p1} s + k_1 k_{i1}} = \frac{(k_{p1} s + k_{i1}) / M_{tot}}{s^2 + (k_{p1} / M_{tot}) s + (k_{i1} / M_{tot})}$$

$T_{Chass}(s)$ présente une fonction de transfert du deuxième ordre qui se compose des deux pôles et un zéro. On considère $Q(s)$ une fonction de transfert d'un système de second ordre privé de zéro qui est comparée avec $f_1(s)$.

Nous pouvons considérer que la boucle du châssis est stable si et seulement si ses pôles sont à parties réelles négatives. Afin d'assurer ces conditions, il existe plusieurs méthodes comme la méthode de placement des pôles ou la méthode de traçage des pôles (Bode, Nyquist ou Nichols) [38][39].

Vu que la fonction de transfert utilisée est de second ordre, il est nécessaire de la comparer avec une autre fonction de transfert d'un système de second ordre qui dépourvu de zéro[40]. Notre fonction de transfert étudiée contient un zéro et deux pôles.

$T'_1(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$ présente la fonction qui dépourvut de zéro où ω_n définit la pulsation naturelle et ξ le coefficient d'amortissement.

Généralement, l'existence du zéro au niveau du numérateur n'a aucun effet sur la stabilité. Le zéro affectera seulement les performances et les réponses transitoires [40].

Pour avoir un système stable, il faut que les pôles soient à parties réelles négatives. Donc pour assurer cette condition nous avons utilisé la méthode de placement des pôles qui dépend de la valeur de ξ :

- $\xi > 1$: Réponse amortie.
- $\xi = 1$: Réponse critiquement amortie.
- $0 \leq \xi < 1$: Réponse sous amortie et oscille.

Considérons t_s le temps de réponse qui représente la durée minimale pour avoir une réponse en régime permanent. Il existe souvent un compromis entre le dépassement de réponse du système et le temps de réponse réduit (abaque du temps de réponse réduit) [41] [26]. Ce compromis est présenté dans la figure a-5 [41].

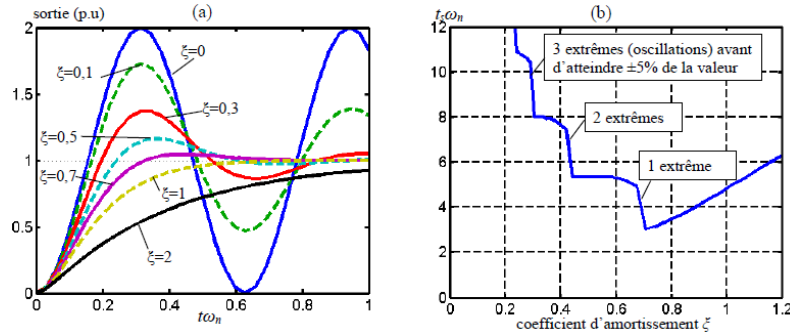


Figure A-5 a) réponse d'un système de second ordre pur et b) abaque du temps de réponse réduit [41] [26]

Pour conserver la stabilité du notre système étudié, il est possible de présenter l'équation de la manière suivante :

$$s^2 + \frac{k_{p1}}{M_{tot}}s + \frac{k_{i1}}{M_{tot}} = s^2 + 2\xi_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2$$

Pour identifier les valeurs des paramètres des deux coefficients k_p et k_i , nous avons utilisé la méthode d'identification tel que :

$$k_{p1} = 2\xi_1\omega_{n1}M_{tot} \text{ et } k_{i1} = \omega_{n1}^2 M_{tot}$$

Pour les pôles de la fonction de transfert, nous les avons identifiés selon les performances recherchées.

Annexe B : Modélisation du véhicule SMART de l'ATEUS

L'annexe B présente l'étude d'un nouveau véhicule. Ce véhicule est basé sur la deuxième génération du SMART et sur la topologie faite de la part de l'association du transport électrique de l'université de Sherbrooke (ATEUS) Figure B-1.

Le sous-système de traction est constitué d'une batterie et d'un supercondensateur qui alimentent la chaîne de traction par une tension. Un onduleur convertit la tension vers une machine électrique de traction qui est couplée à la transmission mécanique du véhicule.

Le couple de la machine électrique est ensuite démultiplié par un réducteur de vitesse puis distribué aux roues par un différentiel mécanique. Chaque élément du VE peut-être modélisé par des relations mathématiques.

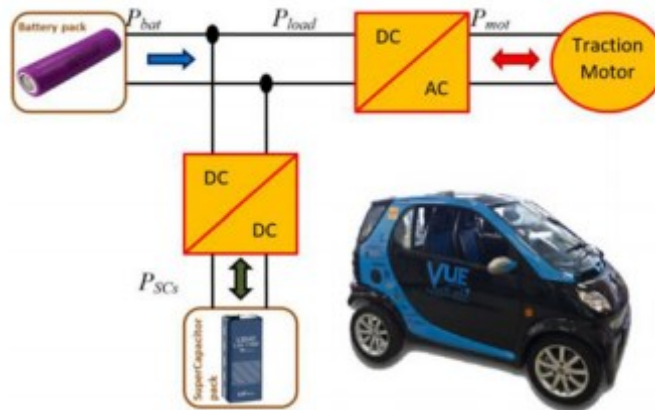


Figure B-1 Topologie d' ATEUS

Ce prototype est alimenté par une batterie Li-ion (7.68 kWh) et propulsé par un moteur synchrone à aimant permanent (30 kW) qui a une vitesse de rotation de 5500 tr/min. Le tableau ci-dessous présente les spécifics du véhicule.

Modélisation du SMART :

Pour valider le SMART en utilisant notre plateforme à échelle réduite, nous avons utilisé les travaux faits sur ce prototype auparavant.

Comme mentionné précédemment, la modélisation dynamique du système étudié est importante et nécessaire pour réaliser une « simulation HIL » où chaque composant est modélisé séparément avant de les intégrer ensemble.

Tableau B-1 Spécifications du véhicule SMART

Variable	Symbole	Valeur	Unité
Masse du véhicule	m	795	kg
Coefficient de frottement	μ_{rr}	0.02	-
Accélération gravitationnelle	g	9.81	m/s ²
Densité d'air	ρ	1.223	Kg.m ⁻³
Coefficient de traînée aérodynamique	C_D	0.35	-
Surface frontale du véhicule	A_f	2.4	m ²
Rayon des roues	r	0.38	m
Rapport de transmission de la boîte vitesse	G_{gb}	3(3 :1)	-
Rendement de la transmission	η_{gb}	92	%

De la même manière que le eCommander, notre prototype a été modélisé et représenté en utilisant le logiciel Matlab/Simulink et la REM comme outil. La figure B-2 présente la REM et la SMC de la SMART qui sera implémentée dans le banc d'essai à échelle réduite.

Les équations mathématiques qui correspondent au composant du SMART et qui ont été utilisées pour la modélisation sont similaires à ceux du eCommander avec différents paramètres.

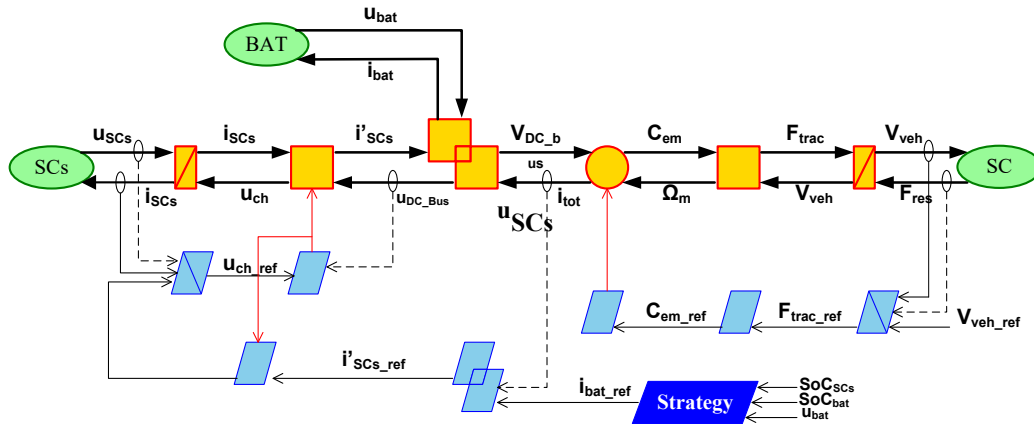


Figure B-2 SMC du SMART

Annexe C : Installation du Movidrive MDX60B/61B

Le MOVIDRIVE® MDX60 / 61B est la nouvelle génération de variateurs de vitesse de SEW. Les nouveaux convertisseurs de fréquence MOVIDRIVE® de la série B sont des appareils impressionnants dotés de nombreuses fonctions de base, d'une large plage de puissance, d'une grande capacité de surcharge et d'une conception modulaire. Ils facilitent l'application sans restriction des convertisseurs de fréquence[42].

1) Schéma de câblage :

Comme présenté dans la figure ci-dessous, le moteur que nous avons utilisé pour émuler l'environnement est une machine synchrone à aimant permanent qui est commandée par un variateur de vitesse de SEW. Le variateur de vitesse est branché sur le réseau de l'université de Sherbrooke suivant le schéma présenté sur la figure C-1. La section de puissance du variateur de vitesse contient quatre parties principales ([X1] [X2] [X3] et [X4]). Où :

- [X1] Connexion d'alimentation triphasée : 1/L1, 2/L2 et 3/L3
- [X2] Connexion moteur : 4/U, 5/V et 6/W
- [X3] Connexion de la résistance de freinage : 8/+R, 9/-R et la terre
- [X4] Connexion pour couplage de liaison CC : -Uz, + Uz et la terre

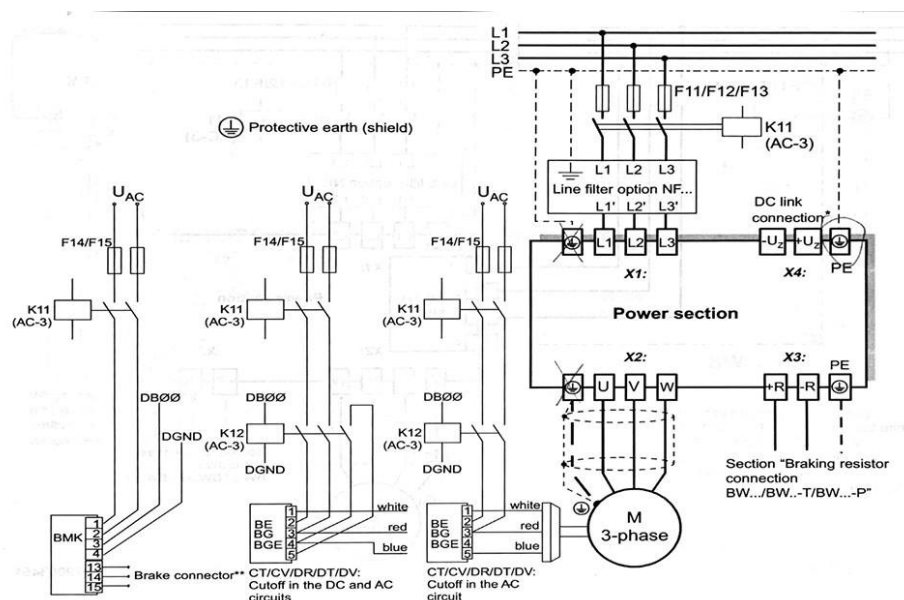


Figure C-1 Schéma de câblage [43]

2) Structure de l'unité :

Après avoir présenté la manière de câblage du variateur sur le réseau d'alimentation, nous avons passé à l'identification des bornes de signal afin de commander et contrôler notre variateur à distance en utilisant le logiciel MOVITOOLS. Pour bien choisir les bonnes bornes des signaux désirés la figure C-2 identifie la nature de chaque borne qui se trouve sur le variateur.

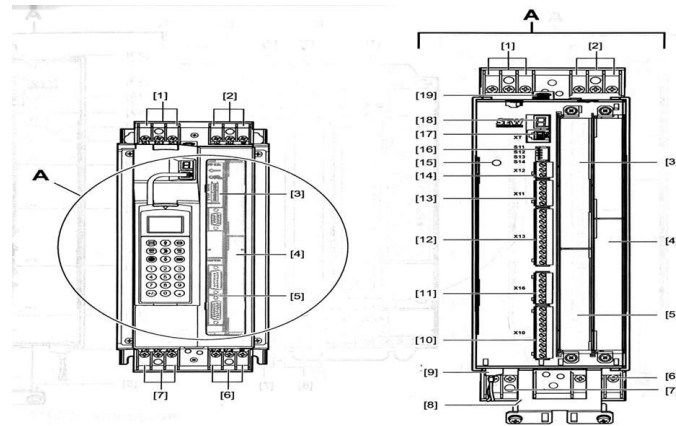


Figure C-2 Structure de variateur [43]

Tableau C-1 Les bornes de variateur de vitesse SEW EURODRIVE :

[1]	X1	Connexion d'alimentation triphasée : 1/L1, 2/L2 et 3/L3
[2]	X4	Connexion moteur : 4/U, 5/V et 6/W
[3]		Emplacement de bus de terrain
[4]		Emplacement d'extension
[5]		Emplacement d'encodeur
[6]	X3	Connexion de la résistance du freinage : 8/+R, 9/-R et la terre
[7]	X2	Connexion pour couplage de liaison CC : -Uz, + Uz et la terre
[8]		Pince du blindage pour câble du signal
[9]	X17	Borne du signal pour contacts de sécurité pour arrêt sécurisé
[10]	X10	Borne du signal pour sortie binaire et entrée TF / TH
[11]	X16	Borne du signal pour entrer et sortie binaire
[12]	X13	Borne du signal pour entrer binaire et interface RS485
[13]	X11	Borne du signal pour la saisie du point de consigne AI1 et la tension de référence de 10v
[14]	X12	Borne du signal pour un système BUS (SBus)
[15]		Vis de terre M4 x 14
[16]		Interrupteur DIP
[17]	XT	Borne de connexion du clavier DBF60B ou l'interface UWS21B
[18]		Segment d'affichage
[19]		Carte mémoire

Test de la machine :

Pour la MSAP, la sortie digitale de la carte d'Opal-Rt est connectée à la borne X16:2 de la SEW VFS tandis que le neutre est connecté à la borne X16:4. L'entrée analogique est également connectée à la borne X16:2 pour mesurer le signal digital en temps réel afin de détecter les défauts. Ensuite, la configuration a été effectuée via le logiciel MOVIDRIVE MOVITOOLS, qui est le logiciel du fabricant SEW. Après que toutes les configurations sont réalisées, nous avons démarré la MSAP dans le but de vérifier que la machine suit les consignes données.

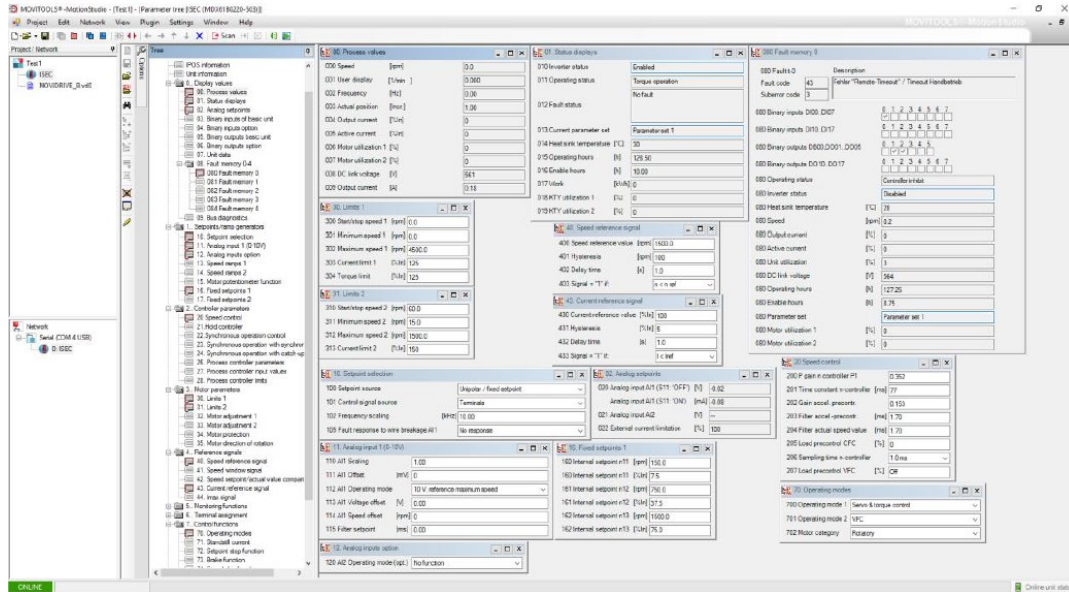


Figure C-3 Configuration des entrées sur MOVITOOLS

Annexe D : Plateforme d'expérimentation e-TESC lab

La plateforme d'expérimentation ou banc d'essai à échelle réduite présente un outil important pour la validation des diverses simulations en temps réel.

La plateforme d'expérimentation est constituée de :

- Une machine asynchrone WEQ :

Variable	Valeurs	unité
Puissance	7.5	kW
Fréquence	60	Hz
Tension nominale	460	V
Courant nominal	12.4	A
Vitesse nominale	1770	rpm
Couple nominal	40.5	Nm
rendement	90.4	%

- Une machine synchrone à aimant permanent :

Variable	valeurs	unité
Courant nominal	20.1	A
Tension nominale	400	V
Courant maximal autorisé	103	A
Vitesse nominale	4500	rpm
Limite dynamique du couple	62,6	Nm

- Une machine asynchrone :

Variable	valeurs	unité
Puissance	27	kW
Fréquence	69	Hz
Tension RMS nominale ligne-ligne	460	V
Courant RMS nominal	304	A
Vitesse nominale	2000	rpm
Couple nominal	45	Nm
Nombre pairs de pôles	2	SI

- Un onduleur SEMITEACH IGBT :

Symbole	variables	valeurs	unité
I_{OUT_MAX}	Courant permanent maximal de sortie	30	A_{RMS}
I_{IN_MAX}	Courant permanent maximal d'entrée	30	A_{DC}
V_{OUT_MAX}	Tension maximale	400	V_{AC}
B_{BUS_MAX}	Tension maximale bus DC	750	V_{DC}
f_{OUT}	Fréquence maximal	500	Hz
f_{CM}	Fréquence de commutation maximale	50	kHz

- Un variateur de vitesse industriel Movidrive MDX60B/61B
- SEVCON Motor Controller : GEN4-72-VDC
- Une carte Microcontrôleurs RTD DM6816 d'Opal-RT (PWM)

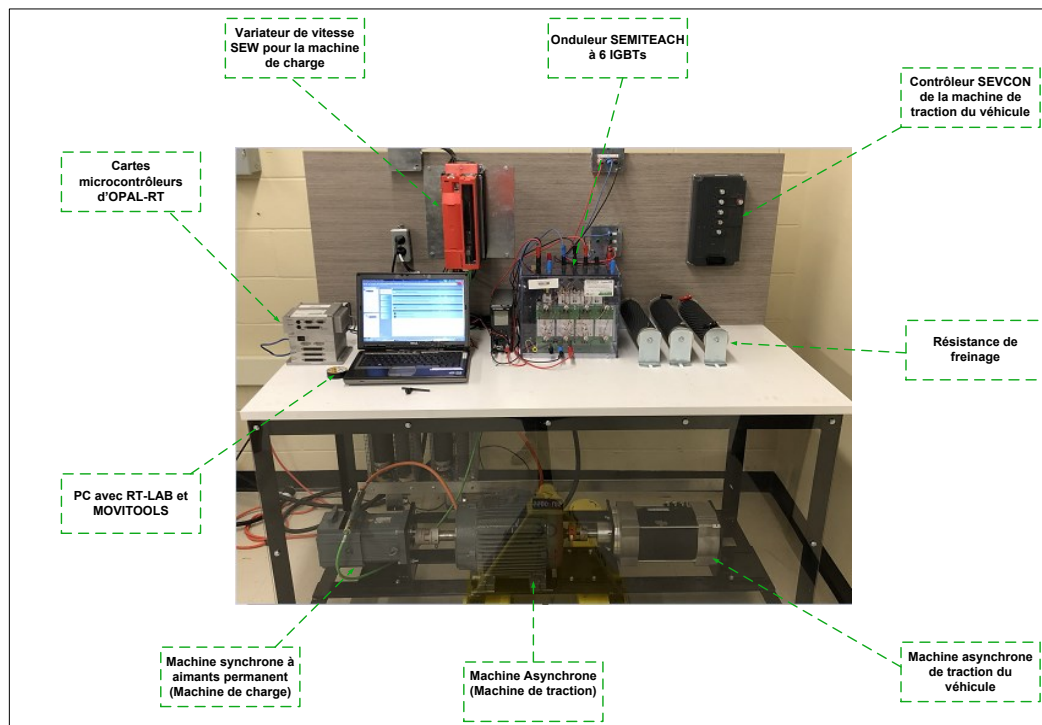


Figure D-1 Banc de test à échelle réduite

Bibliographies

- [1] B. Raul, M. Oviedo, Z. Fan, S. Gormus, and P. Kulkarni, "The Reign of EVs ?," no. June, pp. 61–71, 2014.
- [2] D. E. S. Communautés, "Fr fr .," pp. 2–4, 2004.
- [3] Parlement européen and Conseil de l'union européenne, "RÈGLEMENT (CE) No 715/2007 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 20 juin 2007 relatif à la réception des véhicules à moteur au regard des émissions des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 5 et Euro 6) et aux informations sur la réparation," *J. Off. l'Union Eur.*, vol. 2006, no. 6, p. L 171/1, 2007.
- [4] J. P. Trovão, F. Machado, M. A. Silva, and H. Neves De Melo, "Reduced-scale hardware-in-the-loop simulation to study several hybridization rates of electric vehicles," *2014 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2014*, 2014.
- [5] C. A. Rabbath, M. Abdoune, J. Belanger, and K. Butts, "Simulating hybrid dynamic systems," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 9, no. 2, pp. 39–47, 2002.
- [6] A. Florescu, "Gestion optimisée des Flux Énergétique dans le Véhicule Électrique," University of Grenoble, 2013.
- [7] A. Bouscayrol, "Different types of Hardware-In-the-Loop simulation for electric drives," *Ind. Electron. 2008. ISIE 2008. IEEE Int. Symp.*, pp. 2146–2151, 2008.
- [8] H. M. Kojabadi, L. Chang, and T. Boutot, "Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 3, pp. 547–552, 2004.
- [9] A. Bouscayrol, J. Wilamowski, and B. Irwin, "Hardware-in-the Loop Simulation," *Control Mechatronics*, p. Chapter 33, 2011.
- [10] C. R. Kelber, B. R. R. Reis, and R. M. Figueiredo, "Improving functional safety in autonomous guided agricultural self propelled machines using hardware-in-The-loop (HIL) systems for software validation," *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, pp. 1438–1444, 2016.
- [11] M. Odelga, P. Stegagno, H. H. Bühlhoff, and A. Ahmad, "A Setup for multi-UAV hardware-in-the-loop simulations," *2015 Work. Res. Educ. Dev. Unmanned Aer. Syst. RED-UAS 2015*, pp. 204–210, 2016.
- [12] A. Bouscayrol, W. Lhomme, P. Delante, B. Lemaire-Semail, and S. Aksas, "Hardware-in-the-loop simulation of electric vehicle traction systems using energetic macroscopic representation," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 5319–5324, 2006.

- [13] T. Letrouve, "STRUCTURATION DE LA COMMANDE DE LA SIMULATION AU PROTOTYPE D'UN VEHICULE HYBRIDE DOUBLE PARALLELE AU TRAVERS DE LA REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE," Université Lille1 Sciences et Technologies, 2006.
- [14] A. L. Allegre, A. Bouscayrol, J. N. Verhille, P. Delarue, E. Chattot, and S. El-Fassi, "Reduced-scale-power hardware-in-the-loop simulation of an innovative subway," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1175–1185, 2010.
- [15] A. Bouscayrol, "Hardware-In-The-Loop simulation," in *Industrial Electronic Electronics Handbooks*, Second edi., T. & Francis, Ed. Chicago, 2010.
- [16] A. Bouscayrol, J.-P. Hautier, and L.-S. B, "Graphic Formalisms for the Control of Multi-Physical Energetic," in *Systemic design Methodologies for Electrical Energy*, Tome 1., I. W. Editions, Ed. .
- [17] J. P. Hautier and P. J. Barre, "The causal ordering graph - a tool for modelling and control law synthesis," *Stud. Informatics Control J.*, vol. 13, no. 4, pp. 265–283, 2004.
- [18] "Energetic Macroscopic Representation," 2017. [Online]. Available: <http://www.emrwebsite.org/>.
- [19] A. Bouchoux, "Spectrométrie de multiphysique masse - Principe de systèmes énergétiques et appareillage La REM , formalisme multiphysique énergétiques," 2014.
- [20] Z. Lei, J. Li, S. Jun, C. Jun, and Z. Li, "Closed-loop identification for motion control system," *Proc. World Congr. Intell. Control Autom.*, pp. 477–480, 2010.
- [21] H. K. Lam, F. H. F. Leung, and P. K. S. Tam, "Nonlinear State Feedback Controller for Nonlinear Systems : Stability," vol. 9, no. 4, pp. 657–661, 2001.
- [22] A. Bouirek, "Approche de conception hybride REM-BACKSTEPPING," Université de Quebec à trois rivières, 2016.
- [23] J.-S. Yang, "Design method," in *The control Handbook*, William S. Levine, CRC Press, Inc. IEEE press, pp. 157–238.
- [24] F. E. Bothwell, "S2La2 Nyquist Diagrams and the Routh-Hurwitz Stability Criterion *," pp. 1–4, 1950.
- [25] D. Marx, P. Magne, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, and B. Davat, "Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads-A review," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 1773–1787, 2012.
- [26] C. Depature, "Commandes par inversion d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs," Université de Lille, 2017.

- [27] X. Roboam *et al.*, “Energy Distribution and Strategy,” *2013 World Electr. Veh. Symp. Exhib. EVS 2014*, vol. 2, no. June, pp. 1–5, 2014.
- [28] N. Faria, P. G. Pereirinha, and J. P. Trovao, “Modelling of an Urban Electric MiniBus Using Energetic Macroscopic Representation Graphic Description,” *2015 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2015 - Proc.*, pp. 1–6, 2015.
- [29] CTA, “E-Commender,” 2016. [Online]. Available: <https://cta-brp-udes.com/>.
- [30] A. Bouscayrol, B. Francois, P. Delarue, and J. Niiranen, “Control implementation of a five-leg ac-ac converter to supply a three-phase induction machine,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 1, pp. 107–115, 2005.
- [31] P. Vas, “Sensorless Vector and Direct Torque Control,” *Oxford Univ. Press*, 1998.
- [32] K. H. Nam, “AC Motor Control and Electric Vehicle Application,” *CRC Press*, 2010.
- [33] C.-M. Ong, “Three-Phase Induction Machines,” in *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, .
- [34] R. Krishnan, “Polyphase Induction Machines,” in *Electric Motor Drive: Modeling, Analysis, and Control*, E. Frank, Ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001, pp. 196–215.
- [35] I. Bien, “Comparaison des performances des regulateurs pi et ip appliques aux systemes fondamentaux,” no. 1, pp. 1–15, 2015.
- [36] W. S. Levine and J. T. Gillis, “Standard mathematical models,” in *The control Handbook*, William S. Levine, *CRC Press, Inc. IEEE press*, 1996, pp. 65–84.
- [37] K. Ogata, “Introduction to control systems,” in *Modern Control Engineering*, Fourth Edi., 2002, pp. 1–8.
- [38] F. E. Bothwell, “Nyquist diagrams and the Routh-Hurwitz stability criterion,” *Proceeding IRE*, vol. 11, pp. 1345–1348.
- [39] A. Isidori, M. Benedetoo, and C. Byrnes, “Analysis and design of nonlinear systems,” in *The control Handbook*, William S. Levine, *CRC Press, Inc. IEEE press*, 1996, pp. 861–1017.
- [40] C. Dépature, “Command par inversion d’un véhicule à pile combustible et supercondensateurs,” Université de Québec à Trois-Rivière et l’Université de Lille, 2017.
- [41] R. Stefani and A. Wolovich, “Analysis methods,” *Control Handbook*, William S. Levine, *CRC Press. Inc. IEEE Press*, pp. 115–121.
- [42] SEW Eurodrive, “MOVIDRIVE® B Drive Inverter,” 2010. [Online]. Available: <http://www.seweurodrive.com/produkt/movidrive-b-drive-inverter.htm>.

[43] SEW Eurodrive, *SEW EURODRIVE operating instructions*, 01/2010. .